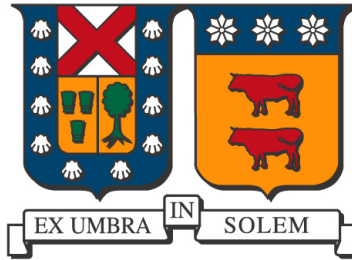


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO - CHILE



“Evaluación técnica de un fungicida de frutos cítricos
que permita determinar la potencia necesaria de
calentamiento”

JOHANN EDUARDO SCHWARZE ACOSTA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: Mg. ING. EUGENIA TORRES
PROFESOR CO-REFERENTE: PhD. ING. MAURICIO OSSES

2019

Agradecimientos

Gracias a mi familia por su amor y paciencia, especialmente a mis padres que me dieron la oportunidad de estudiar además de su apoyo durante todos estos años

Agradecer a todos mis amigos y personas que he conocido que han hecho que los años de estudio fueran más agradable.

A mis maestros de carrera que supieron transmitir todos sus conocimientos para la correcta formación como profesional.

Finalmente gracias a MAF CHILE, por el apoyo para poder realizar este trabajo en sus dependencias y desarrollar mis habilidades que me servirán en mi futuro como profesional.

Resumen Ejecutivo

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad la determinación de la potencia de trabajo de un quemador de gas licuado de petróleo (GLP) que es utilizado para el calentamiento de un equipo que suministra un líquido fungicida a una línea de frutos cítricos y se debe afirmar si el quemador escogido para este proceso es el adecuado. Para esto, se estudia la influencia de parámetros de combustión del quemador y las variables de calentamiento del líquido fungicida.

Mediante este estudio, se determina el valor óptimo de trabajo para el quemador en su funcionamiento actual junto con otros posibles escenarios de funcionamiento y sus costos asociados tanto de combustible como líquido fungicida.

La investigación es de tipo experimental y exploratoria por consiguiente, se realiza un estudio previo a los componentes del equipo junto con variados procedimientos de medición en el área de trabajo para posteriormente cuantificar los valores de las variables de estudio.

Se determina que para las condiciones actuales de funcionamiento, un flujo de cítricos de 93 [Ton/H] en la línea de manipulación, el equipo tiene un consumo de 6,84[kg/H] y trabaja en una potencia de 94,66[kJ/s].

Con dos escenarios posibles de trabajo en el sistema, se concluye que el equipo se encuentra sobredimensionado para el proceso.

Finalmente, se plantean posibles soluciones para mejorar la eficiencia del equipo y disminuir costos de consumo energético.

Nomenclatura

m_{aire} = Masa aire.

m_{GLP} = Masa combustible.

m_{h_2O} = Masa de de H_2O .

h_{fg} = Entalpía de vaporización del agua.

PCS = Poder Calorífico Superior.

PCI = Poder Calorífico Inferior.

\dot{m} = Flujo másico.

\dot{m}_{GLP} = Flujo másico de combustible.

\dot{m}_{aire} = Flujo másico de aire.

\dot{m}_{GE} = Flujo másico de gases de escape.

\dot{V}_{GLP} = Flujo volumétrico de combustible.

ρ_{GLP} = Densidad de combustible.

ρ_{mezcla} = Densidad de mezcla fungicida.

AC = Relación aire combustible.

λ = Coeficiente de exceso de aire.

ϕ = Razón de equivalencia.

E = Energía.

ΔE = Cambio de energía interna.

\dot{E} = Tasa de energía.

\dot{Q} = Flujo de calor.

W = Trabajo.

\dot{W} = Tasa de trabajo.

η = eficiencia.

ΔT° = Variación de temperatura.

Δt = Variación de tiempo.

K = Constante de gas de combustión.

a_t = coeficiente de aire estequiométrico.

$V_{a,e}$ = Volumen de aire estequiométrico.

N = número de moles.

MM = Masa molar.

C_p = Calor específico.

V = Volumen.

X = Concentración porcentual másica.

Y = Concentración porcentual molar/volumétrica.

C_p = Calor específico.

Tabla de Contenido

1. Problema de Investigación	1
1.1. Contextualización del Problema	1
1.2. Definición del Problema	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo General	2
1.3.2. Objetivos Específicos	2
1.4. Justificación e Importancia	3
1.5. Alcance del Proyecto	3
2. Marco Teórico	4
2.1. Proceso de Poscosecha de Cítricos	4
2.1.1. Línea de Manipulación de Cítricos	5
2.2. Equipos de aplicación de fungicidas	7
2.2.1. Aplicación Drencher	7
2.2.2. Balsa de Tratamiento	9
2.2.3. Aplicación on-line por cataratas o dispensadores	10
2.3. Uso y normativa de fungicidas en poscosecha	11
2.3.1. Principales Enfermedades poscosecha	11
2.3.2. Fungicidas y residuos en frutos cítricos	12
2.4. Balance generales de energía para sistemas [4]	15
2.4.1. Balance de energía para sistemas cerrados	15
2.4.2. Balance de energía para sistemas abiertos	16
2.4.3. Balance de energía para sistemas de combustión	16
2.5. Combustión y combustible	17
2.5.1. Combustión	17
2.5.2. Combustible	17
2.5.3. Gas GLP [5]	17
2.5.4. Poder calorífico	19
2.5.5. Parámetros en rendimiento de combustión	20
2.6. Quemadores	23
2.6.1. Rango del quemador	23
2.6.2. Quemadores para gas	23
2.6.3. Sistema de Control	24
3. Proceso de estudio	25
3.1. Partes principales equipo	25
3.2. Funcionamiento y estado del sistema	27
3.3. Flujo de Producción	30

4. Metodología de trabajo	31
4.1. Recolección de información	31
4.1.1. Medición de temperatura líquido fungicida en estanque principal.	31
4.1.2. Identificación de funcionamiento del quemador.	32
4.1.3. Medición de variables de gases de escape	33
4.1.4. Medición del tiempo de proceso antes del llenado de reposición	34
4.1.5. Determinación del calor específico de la mezcla fungicida.	36
4.1.6. Instrumentos de medición utilizados	36
4.1.7. Formato de Medición	37
4.2. Procesamiento de información	38
4.2.1. Balance másico	38
4.2.2. Balance energético	41
4.2.3. Indicadores	45
5. Resultados y Análisis	48
5.1. Resultados a partir de la recolección de información	48
5.1.1. Temperatura del líquido fungicida en estanque principal	48
5.1.2. Medición de gases de escape	51
5.1.3. Tiempo de proceso antes del llenado de reposición	53
5.1.4. Capacidad Calorífica de la mezcla	53
5.2. Análisis	54
5.2.1. Interpretación de resultados de combustión y calentamiento del fluido	54
5.2.2. Determinación de Potencia del quemador	56
5.2.3. Indicadores	60
5.2.4. Potencia de quemador para otros posibles escenarios	63
6. Conclusiones y Recomendaciones	65
Bibliografía	67
A. Combustible GLP	69
A.1. Norma Chilena GLP	69
A.2. Composición	70
A.3. Precio a Granel, Región Metropolitana	71
A.4. Cálculo PCI de GLP	72
B. Equipo Fungicida	73
B.1. Dimensionamiento Equipo	73
B.2. Plano Conjunto Equipo	74
C. Quemador equipo fungicida	75
C.1. Especificaciones	75
C.2. Campo de trabajo	76
D. Fungicida Imazalil	77
E. Dispositivo detector de corriente con Arduino	78
E.1. Código	78
E.2. Montaje Final	81

F. Gases de escape	82
F.1. Calor específico como una función de temperatura	82
F.2. Resultados analizador de gases	83
F.3. Ecuaciones para determinar fracción volumétrica de CO	83

Índice de tablas

2.1. LMR para principales fungicidas en cítricos. La ausencia de valores significa que el fungicida no está registrado para su uso.	14
3.1. Flujos de producción año 2019.	30
3.2. Flujos de producción año 2019.	30
4.1. Extracto de especificaciones técnicas Quemador Riello Rs 34 MZ.	32
4.2. Formato de distribución de mediciones	37
5.1. Condiciones iniciales de primera medición durante experimentación.	48
5.2. Tiempo de calentamiento y enfriamiento del estanque principal en cada ciclo. Primer registro	49
5.3. Condiciones iniciales de segunda medición durante experimentación.	49
5.4. Tiempo de calentamiento y enfriamiento del estanque principal en cada ciclo. Segundo registro	50
5.5. Condiciones iniciales de tercera medición durante experimentación.	50
5.6. Tiempo de calentamiento y enfriamiento del estanque principal en cada ciclo. Segundo registro	51
5.7. Resultados Analizador de Gases , primer registro	52
5.8. Resultados Analizador de Gases, segundo registro.	52
5.9. Resultados Analizador de Gases, tercer registro.	52
5.10. Resultados Promedio de los registros del Analizador de Gases.	53
5.11. Tiempo de proceso antes del llenado de reposición de mezcla fungicida del estanque principal para tres jornadas distintas.	53
5.12. Balance de energía equipo.	61
5.13. Tiempo de calentamientos y enfriamiento del estanque para 150 [Ton/H] de cítricos.	63
A.1. Peso atómicos.	72
B.1. Dimensiones componentes equipo Heat.	73
C.1. Especificaciones técnicas Quemador Riello Rs 34 MZ.	75
D.1. Datos identificación Imazalil.	77
D.2. Propiedades Físicas y químicas Imazalil Fungafloor 500 EC	77
F.1. Tabla con calores específicos para gases de escape	82

Índice de figuras

2.1.	Diagrama de flujo común para proceso poscosecha de cítricos	5
2.2.	Drencher de cabina	8
2.3.	Drencher de cadenas	9
2.4.	Balsa de tratamiento sin empuje de la fruta	10
2.5.	aplicación online mediante boquillas dispensadoras	11
2.6.	Podredumbres verde (izquierda) y azul (derecha) causadas en naranja por los hongos Penicillium digitatum y Penicillium italicum.	12
2.7.	Aplicación imazalil en drencher poscosecha.	13
2.8.	Estructura química Imazalil.	13
2.9.	Abastecimiento tanque GLP para uso industrial.	19
2.10.	Incrustaciones al interior de tubos.	22
2.11.	Quemador a gas a baja presión	23
3.1.	Modelo 3D de equipo "HEAT".	25
3.2.	Intercambiador de calor del equipo	26
3.3.	Quemador de gas conectado al estanque de almacenamiento y tubo de salida de gases de escape	27
3.4.	Aplicación de fungicida en cítricos.	28
3.5.	Sistema de alimentación externo.	29
4.1.	Verificación estado del quemador.	32
4.2.	Medición de gases de escape	33
4.3.	Diagrama eléctrico de detector de corriente.	34
4.4.	Modulo detector de luz con fotodector LDR	35
4.5.	Tarjeta electrónicas utilizadas	35
4.6.	Analizador de gases Testo 340.	36
4.7.	Cronómetro.	36
4.8.	Termómetro de pinchar T160	37
4.9.	multímetro digital Truper.	37
4.10.	Balance másico en el intercambiador de calor.	38
4.11.	Balance másico en el intercambiador de calor.	42
5.1.	Temperatura de estanque principal, primer registro	49
5.2.	Temperatura de estanque principal, segundo registro	50
5.3.	Temperatura de estanque principal, tercer registro	51
5.4.	Tiempo promedio de calentamiento en función de flujo de cítricos, para estanque principal	55
5.5.	Tiempo promedio de enfriamiento en función de flujo de cítricos, para estanque principal.	55

5.6. Tiempo transcurrido antes del inicio de reposición de mezcla fungicida en estanque principal.	56
5.7. Eficiencia de combustión vs temperatura de productos y exceso de aire	59
5.8. Porcentaje de calor disponible respecto al poder calorífico superior como función de la temperatura de los gases de combustión y el exceso de aire.	60
A.1. Norma Chilena NCh72.Of1999, "Gases Licuados de petróleo - Especificaciones".	69
A.2. Composición GLP en Chile.	70
A.3. Precio venta GLP 21 de noviembre de 2019.	71
B.1. Plano Conjunto Fungicida HEAT.	74
C.1. Quemador Riello RS 34 MZ.	76
C.2. Campo de trabajo en quemador Riello RS 34 MZ.	76
E.1. Montaje final equipo detector de corriente.	81
F.1. Ticket de combustión de gases Testo.	83

Capítulo 1

Problema de Investigación

1.1. Contextualización del Problema

En Chile, la industria de exportación de frutos cítricos va en aumento de manera gradual año a año debido a la actual política de acceder a nuevos mercados, en la mayoría asiáticos, para alejarse de la dependencia de EE.UU., país al que se destina más del 60 % de la exportación chilena de cítricos, que corresponde a más de 300.000 toneladas. Además, en las regiones donde el agua es escasa, los cítricos se están transformando en una alternativa para productores que han debido abandonar huertos de uva de mesa y paltos. Esta es una de las razones por la que los productores del norte están planteándose la posibilidad de instalar huertos de cítricos, principalmente de mandarinas o clementinas. En base a las estadísticas de plantación y de los catastros, se puede estimar que se han plantado en el país cerca de 17.000 hectáreas entre las regiones de Coquimbo y Rancagua. [1]

Por otro lado, Los fungicidas poscosecha se emplean tras la recolección para minimizar los daños producidos en los productos frutihortícolas por el ataque de microorganismos, tanto hongos como bacterias. Las enfermedades en productos frutihortícolas pueden producirse por infecciones de la fruta en el campo antes de la cosecha o por infecciones en el almacén originadas por heridas producidas durante su manipulación posterior. Es aquí, donde los tratamientos poscosecha aseguran el control de las enfermedades desde la recolección, pasando por su almacenamiento y procesado hasta llegar al consumidor final.

La mayoría de las estrategias de control de podredumbres parasitarias en poscosecha de frutas se basan en el empleo de productos poscosecha, entre ellos fungicidas.

Debido al grave problema que representan los residuos de productos químicos para la salud humana, los diferentes Estados y en especial los más desarrollados han establecido una serie de límites máximos de residuos bastante restrictivos y que para los próximos años van a seguir disminuyendo.

En los últimos años, en la búsqueda de poder encontrar nuevos métodos complementarios que ayuden a disminuir la cantidad de fungicida (a través de métodos térmicos), se ha comprobado mediante diversos estudios que el uso de fungicidas en agua a temperaturas superiores a 40°C , según variedad cítricos y tiempo de exposición, logra reducir las dosis hasta en un 50 % y mantener su calidad. Es aquí donde el uso de sistemas de calentamiento es de importancia y es donde se enfoca este trabajo. [2]

1.2. Definición del Problema

La empresa Maf Chile, que brinda soluciones técnicas a medida de equipos de procesos de poscosecha de frutas y hortalizas, requiere un estudio técnico relacionado al equipo en cuestión debido al desconocimiento del funcionamiento del quemador de gas actual y requiere saber si el quemador usado es el indicado para el proceso. Además, proyectar de manera más confiable el quemador adecuado para requerimientos particulares de futuros clientes.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Generar una evaluación técnica que permita determinar la potencia necesaria para el calentamiento de un líquido fungicida de frutos cítricos en poscosecha con gas GLP en distintos escenarios de producción.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Estudiar procesos existentes en aplicación de fungicidas de frutos cítricos en poscosecha.
- Establecer un marco teórico relacionado a los componentes térmicos del equipo y el proceso termodinámico en el calentamiento del líquido fungicida.
- Identificar las variables en el proceso térmico de calentamiento del fungicida del equipo a estudiar.
- Medir variables que intervienen en el proceso de intercambio térmico entre el combustible y el líquido fungicida del equipo de una manera que no interfiera en la producción.
- Realizar una evaluación energética al equipo y determinar consumo óptimo de combustible necesario para el calentamiento del proceso
- Determinar la potencia necesaria de los quemadores para distintos escenarios de producción junto con los costos asociados en consumo energético

1.4. Justificación e Importancia

Con la realización de este tema de investigación se podrá tener un concepto más estricto acerca del rendimiento o porcentaje efectivo de utilización de la energía, concepto que siempre se debe tener en cuenta a la hora de valorar la eficacia de un determinado proceso de generación de energía y por ende, llegar a disminuir el consumo energético.

Por otra parte, con este estudio podemos establecer las condiciones adecuadas de calentamiento para distintos escenarios con el fin encontrar una posible respuesta para elegir el equipo y tener en cuenta los costos asociados al combustible para para la empresa. Además de abordar posibles mejoras al sistema para el futuro.

1.5. Alcance del Proyecto

El presente proyecto comprende el estudio, conocimiento de funcionamiento, medición de parámetros y análisis del proceso termodinámico existente en el calentamiento del fungicida de cítricos aplicando técnicas adecuadas y criterios de ingeniería pertinentes.

Se realiza un estudio previo del proceso de calentamiento y se generan los diagramas e información relevante al proceso con el objetivo de evaluar las condiciones y los resultados que se están obteniendo con el tratamiento actual.

Se incluye en el estudio la selección y creación de equipos e instrumentos que serán usados tanto en las líneas de circulación del fluido, como en el sistema de control del quemador.

Luego se podrá ratificar si el quemador es adecuado al proceso o en su defecto seleccionar el idóneo. Para finalizar, se realiza un análisis de calentamiento que permite evaluar los costos de consumo; para distintos escenarios de producción. Esto facilitará la decisión de elección e implementación de nuevos quemadores en futuros proyectos.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Proceso de Poscosecha de Cítricos

En el comercio de frutos cítricos, al igual que en otros productos frutihortícolas, es de especial interés la presentación de los mismos en lotes de características homogéneas, siguiendo criterios cualitativos que faciliten y garanticen las operaciones comerciales. Para ello, los países productores y principalmente exportadores han establecido normas de clasificación de los frutos en categorías de calidad.

En las normas de calidad se establecen las características mínimas que deben presentar los frutos en su aspecto exterior, según el país donde se desea comercializar. Estos deben ser sanos, enteros, limpios, exentos de daños, de manchas, de humedad exterior anormal, de olor y/o sabor extraño. Por otra parte, deben contener un porcentaje mínimo de jugo en relación al peso total del fruto, coloración varietal característica y uniformidad de tamaño, y cumplir con disposiciones relativas a la presentación, homogeneidad y acondicionamiento. Además, los principales comercializadores de fruta exigen que las centrales frutihortícolas tengan protocolos que permitan conseguir que la intervención sobre el alimento cumpla altos estándares de calidad para protección de la salud y medioambiente de los consumidores. (BRC¹, IFS ², MINSAL, etc)

Debido a esto, para el proceso de poscosecha, estas operaciones se realizan en forma mecánica y/o manual en instalaciones especializadas denominadas galpones de empaque. Las construcciones deben ser amplias, ventiladas, con adecuada distribución de la maquinaria que compone la línea de empaque, de manera que permita su limpieza y la circulación interna.

El galpón de empaque debe estar ubicado en las proximidades de caminos, carreteras u otras vías de comunicación con la zona de producción, con los principales centros de consumo y con los puertos habilitados para el embarque de partidas al exterior. Además, se debe disponer en la cercanía de suficiente mano de obra para la realización de las tareas de empaque.

¹British Retail Consortium

²International Food standard

2.1.1. Línea de Manipulación de Cítricos

La línea de manipulación de las centrales frutihortícolas es el elemento que permite transformar un producto agrícola en otro alimentario, todo ello teniendo en cuenta los requisitos legales y de calidad, marcados por la legislación o por las buenas prácticas de los clientes.

La línea de manipulación consta de una serie de equipos encadenados que desarrollan diferentes funciones y otros que, aunque no están propiamente en la línea también son necesarios para los objetivos de calidad y comerciales.

A continuación se describen las operaciones unitarias más comunes que tienen lugar durante el proceso productivo.

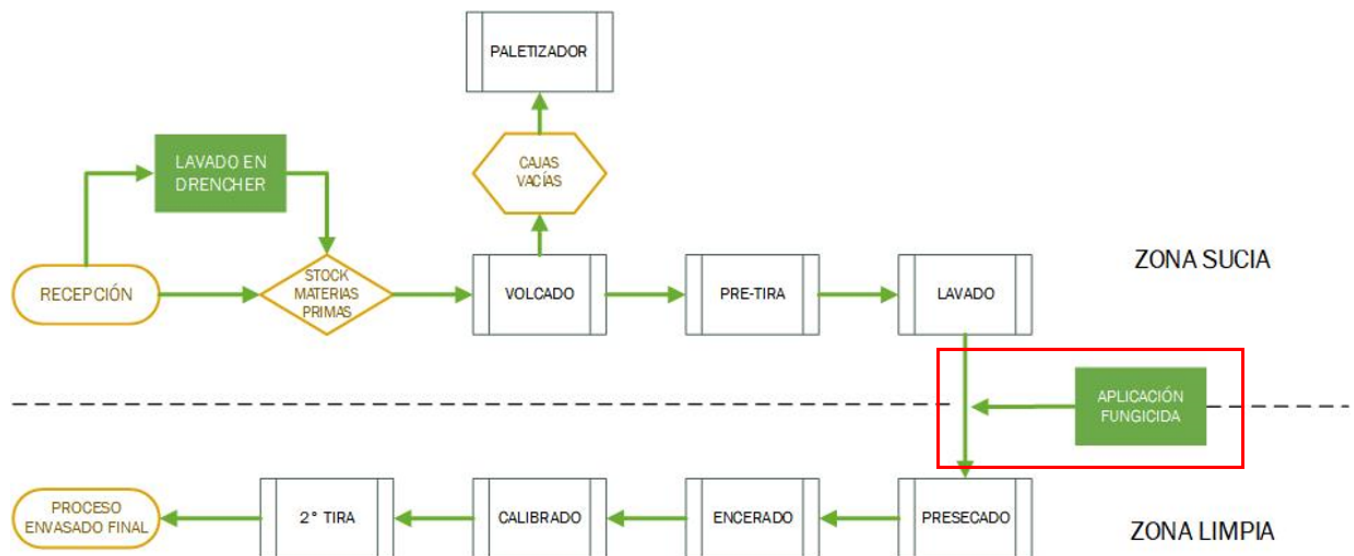


Figura 2.1: Diagrama de flujo común para proceso poscosecha de cítricos

Fuente: Johann Schwarze Acosta

Podemos apreciar en la figura 2.1, entre los equipos de lavado y presecado, es decir entre la zona sucia y limpia de la planta, la zona de aplicación de fungicida, lugar donde se ubica el equipo a analizar.

Recepción de Cítricos

Todos los frutos al llegar a la central son pesados en la báscula situada en la entrada y se les realiza una ficha de identificación que se irá completando a lo largo de todo el proceso de manipulación.

La primera operación que sufre la fruta al llegar al muelle de descarga y ser descargada de los camiones es pasar un control de calidad mediante toma de muestras al azar.

Lavado de Drencher

Este es un proceso optativo previo al que se someten los frutos tras su llegada al almacén y antes de ingresar a la línea de manipulación, en el cual se le aplica un tratamiento fungicida.

Volcado

El proceso en la línea de empaque se inicia en el volcado. Se puede hacer tanto en agua como en seco.

Es de suma importancia regular el caudal de fruta que pasa por la línea de empaque mediante el volcado. Debe ser continuo y asegurar un flujo correcto, obteniéndose de esta manera mayor eficiencia en las restantes etapas de la línea de empaque.

Pre tira o Pre selección

La fruta una vez dentro de la línea pasa mediante una cinta de lona a la mesa de evaluación, donde se eliminan las frutas que no son aptas para la comercialización debido a desperfectos groseros en la piel, frutas chafadas o golpeadas, rotas, manchadas en gran parte de su superficie por el sol, el aire, etc.

Lavado de Frutas

El lavado elimina el polvo, la suciedad, los insectos, las esporas, los pesticidas y otros contaminantes de la superficie de los frutos.

El lavado normalmente se hace con agua y detergente. El detergente se puede aplicar por varios métodos, los más usuales son por pulverización directa con boquillas sobre la fruta o a través de una cortina de espuma.

Aplicación de Fungicidas

Paso previo al encerado, en el cual se aplica fungicidas para la desinfección y eliminación de bacterias en el producto, consiguiendo así reducir pérdidas de peso, mantener la frescura y mejorar la apariencia de los frutos cítricos, prolongando así su vida comercial. El tiempo de exposición del fungicida y su forma de aplicación varía según la necesidad, caudal de cítricos, cantidad de producto, etc.

Encerado

Posteriormente, los frutos pasan a la zona de encerado, donde son envueltos con una fina película de cera con la finalidad de reducir los intercambios gaseosos y su transpiración, mejorando así su conservación y la presentación del producto. Como ceras pueden ser utilizadas ceras sintéticas y ceras naturales, lo cual vendrá determinado en función del destino que dichos frutos lleven. Al igual que en el tratamiento térmico se pueden aplicar conjuntamente distintos productos químicos.

Calibrado

Clasificación de la fruta según su tamaño y en ocasiones por el color. Es obligatorio por la norma de calidad y/o requerimientos de los clientes.

Los calibradores no deben dañar los frutos. El rendimiento por unidad de tiempo debe estar dimensionado para la fruta de menor tamaño que se trabaje. Debe contar con un sistema fluido de salida de la fruta, para que el equipo obtenga un rendimiento adecuado.

Segunda Tira o selección manual

Separación de la fruta en función de la calidad (ausencia de defectos). Es obligatoria por las normas de calidad y como requisito de los clientes.

La selección se debe de hacer sobre toda la superficie de la fruta, por lo que se necesita que a la vez que avanza, se produzca la rotación de la fruta. Requiere una buena iluminación y zonas de selección delimitadas y accesibles al personal de selección. Generalmente se divide el flujo de la fruta para facilitar el acceso a los manipuladores.

Envasado

Preparación de los frutos en unidades de venta.

En el envasado, es fundamental el suministro regular de los materiales de empaquetado y el mantenimiento de un flujo fluido de salida de los envases llenos.

2.2. Equipos de aplicación de fungicidas

Tal como se mencionó anteriormente el proceso de aplicación de fungicidas tiene como objetivo la desinfección y buena presentación del cítrico y la preparación previa para el encerado.

Actualmente existen distintos tipos de tratamientos de aplicación de fungicidas en el mercado, cada uno con su principio de funcionamiento particular, pero con la misma finalidad antes mencionada. Existen dos tipos principales de aplicación de fungicidas: mediante sistema de duchado sobre palets contenedores (Aplicación drencher) y aplicación directa en la línea de proceso (Aplicación on-line).

2.2.1. Aplicación Drencher

Un drencher es una máquina especialmente diseñada para aplicar de manera fácil y uniforme los diferentes tratamientos fungicidas a los frutos en poscosecha, empleando el agua como canal de difusión. Este es el primer proceso al que se someten los frutos tras su llegada al almacén.

Una de las características de este tipo de dispositivos es que el agua usada, con los correspondientes productos diluidos o en suspensión en ella, pasa a través de los palets reciclándose. Además, en la mayoría de casos disponen de un dosificador que permite trabajar con un mínimo de litros de agua que se gradúan en función de los litros arrastrados por el palet, la entrada de agua y los productos usados.

Drencher de cabina

Para los drencher de cabina, Figura 2.2, el agua con el producto es aplicada directamente desde la parte superior y a modo de catarata sobre el palet completo o pila de bins. El sistema de aplicación

de agua puede ser fijo o móvil y tener una o más cabinas. Para el caso de un drencher móvil, la cabina se desplaza por aquella línea a la que se va a realizar el tratamiento.

Este tipo de drencher incorpora un depósito inferior para recogida de líquido y bomba de impulsión del mismo para que sea aplicado por la parte superior. Además posee un panel con temporizador a través del cual podrá regular el tiempo de aplicación del producto.

El drencher de cabina puede ser fabricado en acero inoxidable o en hierro pintado.

La balsa inferior tienen como promedio una capacidad de 1500 litros y su sistema de duchado superior es mediante cataratas a un caudal variable máximo de $50 [m^3/h]$.



Figura 2.2: Drencher de cabina

Fuente: <http://www.tecnovill.com>

Drencher de cadenas

Consiste en un transportador de cadenas con movimiento continuo, Figura 2.3, de longitud variable, una cabina para evitar salpicaduras al exterior, en cuyo techo están situadas las duchas para el tratamiento. La cadena permite situar uno o más palets, depende de lo largo que se haga el transportador, antes de la ducha y la prolongación del mismo después de tratada la fruta permite la eliminación del agua en exceso que arrastra el palet y la fruta.

La alimentación de agua a las duchas, se hace mediante unas bombas situadas en la parte inferior de los depósitos, que suelen tener una cabida total de 2000-3000 [L], llevando en el exterior, un indicador de la cantidad de agua que hay en los mismos. Algunos modelos, permiten ajustar el volumen usado para la ducha teniendo en cuenta los palets que van a pasar a lo largo del dispositivo y el agua que necesitan las bombas para funcionar.



Figura 2.3: Drencher de cadenas

Fuente: <http://www.tecnovill.com>

2.2.2. Balsa de Tratamiento

El funcionamiento de esta máquina consiste en la descarga del producto en la parte inferior de la balsa, Figura 2.4, dicho producto se deposita a granel, en una transportadora situado en el interior de la balsa. El desplazamiento de la fruta dentro de la balsa puede ser realizado por el propio empuje de la fruta que entra o impulsada por un sistema de barrido que asegura un tiempo fijo de exposición al tratamiento de los fungicidas necesarios para su desinfección. Cuando el producto ha sido tratado, llega al final del transportador donde recibe una cortina aire a temperatura ambiente, consiguiendo así un perfecto secado del producto.

Tratada una determinada cantidad de fruta será necesario renovar el líquido de la balsa. Para evitar que éste caldo pueda ir directamente a la red de alcantarillado, hay equipos que disponen de sistemas de depuración o tratamiento del caldo. Además, el equipo debe tener un sistema de vaciado rápido para evitar el sobre-tratamiento.

Las dimensiones del equipo varían según el diseño o modelo y los tiempos de producción.



Figura 2.4: Balsa de tratamiento sin empuje de la fruta

Fuente: Johann Schwarze

2.2.3. Aplicación on-line por cataratas o dispensadores

Del mismo modo que para la balsa de tratamiento, la mezcla desinfectante con fungicida es aplicada sobre el producto depositado a granel que se desplaza por avance propio o por medio de barras de cepillos rotativos.

Este equipo generalmente es ubicado, después del lavado y antes del encerado, con el fin de que se adhiera con mayor eficacia el producto y se entregue en las mejores condiciones al posterior encerado.

El producto puede ser aplicado de forma de cataratas o con el uso de boquillas dispensadoras que pulverizan el líquido de manera que pueda mantener el rendimiento de desinfección con dosis más pequeñas del fungicida (Figura 2.5). Además evita una reposición de líquido alta como en los otros tipos de equipos. La cantidad de producto aplicado va a depender de la concentración del fungicida y la velocidad de paso de los frutos.

Si bien el depósito de fungicidas sobre los frutos producido por la ducha no es tan perfecto como el logrado con el baño, en general la eficacia del control de podrido es comparable en ambos casos.



Figura 2.5: aplicación online mediante boquillas dispensadoras

Fuente: <https://www.bibliotecahorticultura.com>

2.3. Uso y normativa de fungicidas en poscosecha

Todos los productos vegetales sin procesar son objeto después de la recolección del ataque por parte de microorganismos, tanto hongos como bacterias.

Las frutas frescas en especial, y aquellas hortalizas con un alto contenido de humedad y de nutrientes, son los más susceptibles a estos ataques parasitarios. Esto provoca graves mermas y pérdidas por podredumbres durante la comercialización de estos productos, si no se actúa de una manera eficaz contra dichos agentes patógenos.

Los tratamientos poscosecha son aquellos que aseguran el control de las enfermedades de dichos cultivares durante los procesos realizados desde la recolección de la fruta hasta la llegada al cliente final, pasando por todas las fases de clasificación en su caso desverdización/maduración/ conservación, clasificación, empaquetado, transporte a los mayoristas-minoristas o supermercados y compra y consumo final por parte de usuario final, el consumidor.

No fue hasta la aparición de los fungicidas de postcosecha, cuando se consiguió controlar de una forma efectiva las enfermedades con unos márgenes de seguridad adecuados desde el punto de vista no sólo comercial sino también toxicológico.

2.3.1. Principales Enfermedades poscosecha

La gran mayoría de los podridos parasitarios que se producen desde que los frutos son recolectados hasta que llegan al consumidor son debidos a hongos patógenos causantes de enfermedades conocidas habitualmente como podredumbres. Los principales padecimientos que afectan a los cítricos californianos que están presentes en gran cantidad en nuestro país son el *Penicilium* azul y verde (*Penicillium decays*). Sus características y tratamientos difieren en cada caso.



Figura 2.6: Podredumbres verde (izquierda) y azul (derecha) causadas en naranja por los hongos *Penicillium digitatum* y *Penicillium italicum*.

Fuente: www.sciencedirect.com/

- *Penicillium digitatum* (moho verde): Es el tipo de lesión más común en todos los frutos cítricos en poscosecha y se presenta a lo largo de todo el ciclo de comercialización. Ataca a la fruta cuando presenta heridas en su superficie y se encuentra en un entorno con una temperatura de 20° C y humedad relativa alta.
- *Penicillium italicum* (moho azul): Al igual que el anterior, es un tipo de patógeno muy común causante de las podredumbres poscosecha. Ataca a la fruta cuando presenta lesiones en su corteza formando puntos de 5 a 10 mm de diámetro.
- *Alternaria citri*: La presencia de esta enfermedad aprovecha cualquier alteración o herida para instalarse, produciendo unas manchas circulares necróticas sobre el limbo foliar, que después de necrosarse, se extienden a lo largo del nervio y el haz. En el fruto aparecen pequeñas áreas circulares que crecen con el tiempo, de textura corchosa.
- *Geotrichum candidum*: Se trata de un hongo que se instala en los frutos por heridas. Se da con frecuencia sobre la fruta madura con defectos y almacenada. Es un podrido blando, con un olor agrio que atrae a las moscas de la fruta que depositan sus huevos sobre las masas podridas.
- *Rhizopus*: Es una podredumbre blanda, con pérdida de líquidos, y la corteza adquiere una coloración marrón. A temperaturas superiores a 10° C los frutos son recubiertos con abundante micelio de color blanquecino, que origina unas largas hifas terminadas en unos puntitos negros.
- *Diplodia*: Podredumbre muy importante en regiones cálidas y húmedas. Se produce por heridas de cualquier tipo y las temperaturas extremas y ataques de insectos favorecen la instalación del hongo. Aparece alrededor del pedúnculo una coloración a la que sigue un ablandamiento de la zona y una tonalidad marrón.
- *Botrytis*: También conocida como la podredumbre gris o moho gris, es un hongo patógeno y necrotrófico capaz de producir la muerte celular de la planta afectada.

2.3.2. Fungicidas y residuos en frutos cítricos

La mayoría de las estrategias de control de podredumbres parasitarias de poscosecha a lo largo del mundo, se basan en el empleo de fungicidas. Dentro de los más comunes podemos destacar el

fungicida imazalil.

Es un fungicida sistémico utilizado para el tratamiento poscosecha de cítricos, plátano, pera, manzana y piña entre otros.

Se aplica conjuntamente con otros productos y ceras de recubrimiento. Se aplican mediante pulverización directa sobre los frutos o mediante ducha sistema Drencher o por inmersión de los frutos en la solución fungicida con posterior escurrido



Figura 2.7: Aplicación imazalil en drencher poscosecha.

Fuente: <http://www.fomesa.net>

El imazalil pertenece a la familia de los fungicidas imidazoles, cuyo modo de acción es por medio de la inhibición de la biosíntesis del ergosterol, modo de acción que coincide con el de otros fungicidas como piperazinas, morfolinas, piridinas, pirimidinas y triazoles. Todos ellos coinciden en su estructura química en:

- Tienen un anillo que al menos contiene un nitrógeno.
- La mayoría contienen al menos un átomo de carbono asimétrico.

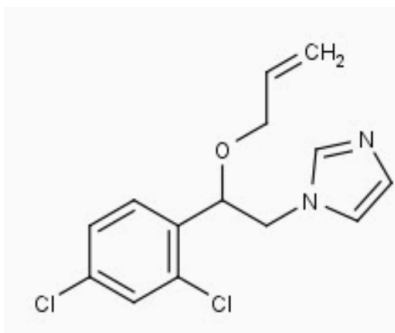


Figura 2.8: Estructura química Imazalil.

Fuente: www.agrochem.es/

Límites máximos de Residuos [3]

Actualmente el Imazalil y otros fungicidas frutihortícolas son autorizados para su uso de poscosecha siempre que cumplan con los reglamentos sanitarios y ambientales del país donde se comercialize. Para estos se definen los Límites Máximos de residuos (LMR) que contemplan el nivel máximo de residuos plaguicida permitidos por ley en los alimentos o piensos (tanto en el interior como en la superficie) cuando los plaguicidas se aplican correctamente conforme a las buenas prácticas agrícolas.

En nuestro país se ha contemplado los plaguicidas con Registro nacional, otorgado por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), definiendo Límites Máximos de Residuos (LMR) para un total de 164 plaguicidas y Límites Máximos de Residuos Extraños (LMRE) para 6 plaguicidas. De este total de plaguicidas, 38 son nuevos respecto a la Resolución 33/2010, como también, se eliminaron 15 plaguicidas. En la tabla 2.1 se puede apreciar los valores LMR de algunos plaguicidas en la Unión Europea y en Chile.

Tabla 2.1: LMR para principales fungicidas en cítricos. La ausencia de valores significa que el fungicida no está registrado para su uso.

Fungicida	LMR Frutos cítricos [ppm]				
	Chile	Argentina	EEUU	UE	Japón
Imazalil	5	5	10	5	5
Propiconazol	0.05	6	8	-	8
Procloraz	10	5	-	10	5
Pirimetanol	7	-	-	0.01	5
Tiabendazol	7	10	10	7	10

Fuente: Johann Schwarze

Actualmente, La fruta se analiza en destino y si se exceden los LMR los exportadores se enfrentan a reclamaciones, que pueden ir desde avisos o penalizaciones en precio o cantidad a suministrar hasta la devolución de la fruta exportada y la pérdida del cliente. Estos LMR fijados por las autoridades permiten que, si se hace un buen manejo de los fungicidas, la fruta tenga unos residuos suficientes de los mismos para protegerla frente a los patógenos de poscosecha durante toda su vida comercial. Sin embargo, en los últimos años una agresiva publicidad negativa de organizaciones ecologistas que clasificaba a los supermercados según los niveles de pesticidas analizados en su fruta, ha provocado que algunos supermercados teman encabezar estas listas y estén reclamando a sus proveedores niveles de residuos permitidos por debajo del 50 o incluso del 33 % del LMR.

Es por esto que desde hace unos años, se han buscado nuevas maneras de disminuir las cantidades de fungicidas utilizadas. Actualmente se ha demostrado que los fungicidas en agua caliente (alrededor de $40^{\circ}C$) permiten mantener su efectividad frente al patógeno, con la mitad de la dosis. La aplicación de los fungicidas con agua caliente implicaría una disminución en residuos sobre los frutos, permitiendo así manejar los fungicidas dentro de los límites máximos de residuos (LMR) y menores costos. Para esto se requieren equipos de calentamientos adecuados para el sistema de aplicación del producto, tema al que está dedicado este trabajo de investigación.

2.4. Balance generales de energía para sistemas [4]

Para poder estudiar un equipo térmico es necesario comprender previamente como funciona el proceso y saber cuales son las variables y condiciones que se deben tener en cuenta al realizar un análisis de esta índole.

Uno de los principales intereses del balance de energía es determinar la cantidad de energía que tiene un sistema sin embargo, esta no puede ser determinada, es decir, no podemos conocer la energía absoluta en un momento determinado. En realidad lo que interesa es conocer los cambios en los niveles de energía que puede experimentar un sistema para lo cual es necesario definir claramente la frontera entre el sistema o sus partes y los alrededores o el entorno.

Los objetivos principales del balance de energía son:

- Determinar la cantidad de energía necesaria para un proceso
- Determinar las temperaturas a las cuales el proceso es más eficiente.
- Disminuir el desperdicio de energía.

Sin embargo, el principal objetivo es la estimación de costos de operación del proceso, ya que el gasto energético es una de las variables más importantes.

Lo primero que se debe considerar es el sistema involucrado es decir, definir la región en el espacio para el análisis. Además de identificar las superficies que separan al sistema de sus alrededores o sea, las fronteras. Los sistemas pueden considerarse cerrados, abiertos, dependiendo de como intercambian materia y energía con sus entornos.

El balance de energía para cualquier sistema que experimenta alguna clase de proceso se define como:

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E_{sistema} \quad (2.1)$$

Esto quiere decir que la diferencia de transferencia neta de energía por calor trabajo y masa es igual al cambio de las energías internas, cinética, potencial, etc.

También puede ser expresado en forma de tasa:

$$\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} = \Delta dE_{sistema}/dt \quad (2.2)$$

Esto quiere decir, que la tasa de transferencia neta de energía por calor trabajo y masa es igual a la tasa de cambio de energía interna, cinética potencial, etc.

2.4.1. Balance de energía para sistemas cerrados

Un sistema cerrado (conocido como masa de control) consta de una cantidad fija de masa y ninguna otra puede cruzar su frontera, con la excepción de la energía en forma de calor.

Para un sistema cerrado que experimenta un ciclo los estados inicial y final son idénticos, es decir, $E_{entrada} = E_{salida}$. Por lo tanto, el balance energético para un sistema cerrado puede ser expresado como:

$$W_{neto,salida} - Q_{neto,entrada} = \Delta E \quad \text{ó} \quad Q - W = \Delta E \quad (2.3)$$

2.4.2. Balance de energía para sistemas abiertos

Un sistema abierto, o un volumen de control, como suele llamarse, es una región elegida apropiadamente en el espacio. El flujo por estos dispositivos se estudia mejor si se selecciona la región dentro del dispositivo como el volumen de control. Tanto la masa como la energía pueden cruzar la frontera de un volumen de control.

La ecuación de balance de energía para este caso queda representada de la siguiente forma:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{salida} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum_{entrada} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (2.4)$$

Cuando el fluido experimenta cambios insignificantes en sus energías cinéticas y potencial (es decir, $\Delta ec \cong 0$, $\Delta ep \cong 0$), el balance puede reducirse a:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{salida} \dot{m} h_{entrada} - \sum_{entrada} \dot{m} h_{salida} \quad (2.5)$$

2.4.3. Balance de energía para sistemas de combustión

Cuando los cambios de energía cinética y potencial son insignificantes, un sistema de flujo estacionario químicamente reactivo puede ser expresado como:

$$\dot{Q}_{ent} + \dot{W}_{ent} + \sum \dot{n}_r \left(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ \right)_r = \dot{Q}_{sal} + \dot{W}_{sal} + \sum \dot{n}_p \left(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ \right)_p \quad (2.6)$$

Donde \bar{h}_f° corresponde a la entalpía de formación, la cual corresponde a la entalpía de una sustancia en un estado especificado debido a su composición química. Mientras los otros dos términos en el paréntesis, representan la entalpía sensible relativa al estado de referencia estándar, es decir, la diferencia entre \bar{h} (la entalpía sensible en un estado especificado) y \bar{h}° (la entalpía sensible en un estado de referencia estándar de 25° y 1 atm).

Para nuestro estudio de un sistema de calentamiento de un fungicida, utilizando gas natural, la ecuación de balance de energía donde que relaciona el combustible mencionado, la cesión de calor hacía el líquido y el calor desprendido de los gases de escape, puede ser expresado en términos másicos como:

$$\dot{m}_{comb} PCI + \dot{m}_{aire} \Delta h_{aire} = \dot{Q}_{sal} + \dot{Q}_{gases} \quad (2.7)$$

Donde PCI, corresponde al poder calorífico inferior del combustible y Δh_{aire} , es la variación del entalpía del aire según lo expresado en la ecuación (2.6). El calor de salida queda expresado en kJ/kg.

El desarrollo de este balance será explicado en el capítulo siguiente.

2.5. Combustión y combustible

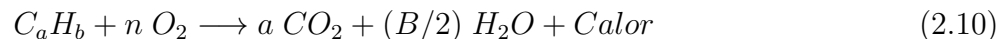
2.5.1. Combustión

Combustión es el conjunto de procesos físico-químicos en los que un elemento combustible se combina con otro elemento comburente (generalmente oxígeno en forma de O_2 gaseoso), desprendiendo luz, calor y productos químicos resultantes de la reacción (oxidación). Como consecuencia de la reacción de combustión se tiene la formación de una llama. Dicha llama es una masa gaseosa incandescente que emite luz y calor.

Las reacciones básicas de combustión corresponden a las reacciones de oxidación del carbono (C) y del hidrógeno (H) mediante oxígeno, que puede aportarse en forma pura (oxicombustión) o mediante el aporte de aire que lo contiene en una proporción media del 21 %. Estas reacciones son:



Pero estos dos componentes químicos no se encuentran habitualmente en estado puro para actuar como combustibles (salvo el carbono en el carbón de origen fósil). Los combustibles tienen una composición general que se puede expresar como C_aH_b y cuya reacción de combustión es:



2.5.2. Combustible

Cualquier material que puede quemarse para liberar energía recibe el nombre de combustible, los cuales se encuentran formados por carbono e hidrógeno a los que se denomina combustibles hidrocarburos existen en todas las fases, y algunos son el carbón, la gasolina y el gas natural. Los combustibles son sustancias que al combinarse con el oxígeno producen un gran desprendimiento de calor.

2.5.3. Gas GLP [5]

El GLP o gas licuado del petróleo, es un combustible que se fabrica con butano y propano a presión, pasando de estado gaseoso a líquido, ocupando menor volumen y facilitando así su transporte y distribución. El GLP procede en un 30 % del proceso de refinado del petróleo y en un 70 % de los yacimientos de gas natural o petrolíferos. Se utiliza en la industria y el transporte por sus ventajas económicas y ecológicas respecto a la gasolina y al gasóleo.

Características

- **Composición:** Su composición puede variar de la zona territorial, pero esta compuesto principalmente por propano y butano (gases pesados), que al ser combinados dan como producto final el GLP.
- **Corrosión:** El GLP no corroe el acero, ni el cobre o sus aleaciones y no disuelve los cauchos sintéticos por lo cual éstos materiales son empleados en el suministro de combustible.

- **Auto Ignición:** El GLP necesita llegar a una temperatura de 450° para estallar.
- **Toxicidad:** No es tóxico, los trastornos fisiológicos se producen cuando la concentración del gas es elevada en aire y no existe desplazamiento de oxígeno.
- **Olor y color:** No posee olor ni color natural, por lo que se añade un odorizante para poder detectarlo en posibles fugas.

Aplicaciones

- **Sector Residencial:** En el sector doméstico o residencial, las aplicaciones de GLP son múltiples y conocidas por todas las personas que habitan en las ciudades, donde el combustible se emplea para la cocción de alimentos, calentamiento de agua y la calefacción.
- **Sector Industrial:** Utilizado como fuente de energía en distintos procesos industriales como fabricación de vidrios, tratamiento térmico de metales, generación de vapor, etc. Generalmente se utiliza tanques ubicados en la propiedad de cada cliente que es abastecido regularmente.
- **Transporte:** Usado como combustible para vehículos y equipos de mayor tamaño. También es usado para el funcionamiento de gruas horquilla y de embarcaciones náuticas.

GLP en Chile

En Chile, ENAP produce GLP en sus refinerías ubicadas en las regiones de Valparaíso y Biobío y en su planta de Cabo Negro, ubicada en el Estrecho de Magallanes, donde el GLP proviene de la separación del gas natural. Sin embargo, Chile actualmente no es autosuficiente y debe importar más del 70 % del GLP que utiliza, ya sea vía terrestre, poliducto desde Argentina y por vía marítima.

Para la distribución del combustible a granel de uso industrial, se utilizan islas de cargas o estaciones de servicio especiales para carga del combustible en camiones que posteriormente, transportan el gas a estanques en la superficie, de domicilios, conjuntos inmobiliarios e industrias, que son clientes con alto volumen de consumo.



Figura 2.9: Abastecimiento tanque GLP para uso industrial.

Fuente: www.gascoeduca.cl

Los requisitos de la mezcla de hidrocarburos para el Gas licuado de Petróleo o GLP en Chile están establecidos en la norma Chilena NCh72.Of1999, "Gases Licuados de petróleo - Especificaciones". En ella no se establecen una composición determinada para el combustible que se comercializa en Chile, pero los límites de componentes máximos permitidos (Ver Apéndice D.1).

2.5.4. Poder calorífico

Es la cantidad de energía (calor) desprendida por una unidad de combustible en su combustión completa para unas condiciones determinadas de presión y temperatura de los productos que reaccionan y de los productos resultantes.

Para los combustibles cuyos productos de la combustión (gases quemados) contienen vapor de agua, se debe diferenciar si la cantidad de energía medida incluye la energía correspondiente al calor de vaporización de ese vapor de agua o no. Efectivamente, si los gases quemados se evacúan directamente a la atmósfera sin actuar sobre ellos, la energía incorporada a la entalpía del vapor de agua en forma de calor latente de vaporización no se aprovecha, pero si estos gases quemados se enfrían, se puede aprovechar el calor sensible de los gases, pero lo que es más importante, si se disminuye la temperatura por debajo de la temperatura de punto de rocío del vapor de agua, éste condensa, cediendo (exotérmico) el correspondiente calor de condensación, y obteniendo una energía adicional que puede representar hasta un 11% del total de energía en el caso del gas natural. Por ello, se definen dos tipos de poder calorífico según la temperatura final de los gases quemados:

- Poder calorífico superior (PCS): es la cantidad de energía desprendida por una unidad de combustible enfriando los gases quemados hasta 0° a presión atmosférica. En estas condiciones, el vapor de agua ha condensado, cediendo su calor latente de vaporización (en este caso de condensación). Se mide en kJ/kg.

- Poder calorífico inferior (PCI): es la cantidad de energía desprendida por una unidad de combustible enfriando los gases quemados hasta 0° a presión atmosférica, pero sin considerar el calor latente de condensación del vapor de agua producido. Se mide en kJ/kg.

Ambos poderes caloríficos se relacionan por medio de:

$$PCS = PCI + (mh_{fg})_{H_2O} \quad (2.11)$$

Donde m es la masa de H_2O en los productos por unidad de masa de combustible y H_{fg} es la entalpía de vaporización del agua a una temperatura específica. En Chile, La combustión completa de un kg de GLP genera alrededor de 12.100 kilocalorías.³

2.5.5. Parámetros en rendimiento de combustión

El rendimiento de un proceso es la relación entre la energía realmente útil que se obtiene y la energía que se emplea. En una combustión es la relación entre el calor útil y la energía del combustible empleada para obtenerlo:

$$\eta = \frac{\text{Calor útil}}{\text{Energía de combustible}} \quad (2.12)$$

El calor útil es la parte de la energía contenida en el combustible que realmente podemos aprovechar, es decir, después de deducir las pérdidas propias del proceso y que a continuación se relacionan:

- **Pérdida de calor por radiación:** Por ejemplo, las paredes de la caldera aumentan su temperatura, produciendo una emisión de calor por radiación al entorno.
- **Pérdidas de calor sensible en los gases quemados:** Los productos generados en la combustión, así como los gases inertes que no reaccionan, se evacúan a una temperatura superior a la de entrada de combustible y comburente, por lo que en ellos se pierde cierta cantidad de calor en forma de calor sensible.
- **Pérdidas de calor latente en el vapor de agua:** El vapor de agua generado en la combustión incorpora una gran cantidad de calor correspondiente al calor latente de vaporización preciso para su generación.

Por lo tanto, considerando estas pérdidas, el rendimiento lo podemos expresar como:

$$\eta = \frac{\text{Energía de combustible} - \text{Pérdidas}}{\text{Energía de combustible}} \quad (2.13)$$

³Fuente: Gasco

Para un proceso o equipo de producción de calor dado, el rendimiento térmico será mayor a medida que el calor de los humos sea menor. Si suponemos que las pérdidas sólo se deben al calor que se escapa por la chimenea al salir los gases de escape, el rendimiento sería:

$$\eta = \frac{\text{Energía de combustible} - \text{Calor gases escape}}{\text{Energía de combustible}} \quad (2.14)$$

Dentro de los parámetros o variables que influyen en el rendimiento óptimo de la combustión podemos destacar:

- a) **Coeficiente de exceso de aire:** es la relación entre el volumen de aire aplicado a una combustión y el volumen preciso para una combustión estequiométrica. Se representa mediante un número adimensional (λ) cuyo valor puede ser:

$\lambda = 1$: aire preciso para una combustión estequiométrica.

$\lambda < 1$: defecto de aire, se dice que la mezcla es rica y la combustión incompleta.

$\lambda > 1$: exceso de aire, se dice que la mezcla es pobre y la combustión puede ser completa.

Conseguir una mezcla perfecta entre combustible y comburente para obtener una combustión completa con una relación estequiométrica de masas entre ellos es muy difícil, por lo que habitualmente se incorpora un exceso de aire a la combustión. Esto evita la producción de inquemados, en especial el monóxido de carbono, aun cuando este exceso produce una reducción del rendimiento de combustión al tener que calentar un mayor volumen de aire, en especial sus inertes (N_2) que se evacúan con los productos de la combustión.

- c) **Relación aire combustible:** Para cuantificar las cantidades de aire y combustibles en procesos de combustión se utiliza la relación aire-combustible. Se define como:

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} \text{ ó } \frac{\dot{m}_{aire}}{\dot{m}_{comb}} \quad (2.15)$$

La relación aire combustible debe estar tan baja como sea posible con el fin de ahorrar combustible. Sin embargo, a no ser que se utilice exceso de aire en la cámara de combustión, puede tener lugar una combustión incompleta, que también malgastará combustible, pudiendo haber riesgo de explosión por ignición retardada en el hogar del combustible no quemado. Para asegurar una combustión completa, debe suministrarse exceso de aire en cantidades que varían entre el 20 y el 30 por 100, dependiendo del combustible utilizado, la carga de caldera y su configuración.

De la relación de aire combustible teórico y real, surge el concepto de **Razón de equivalencia** (ϕ) definida como:

$$\phi = \frac{AC_{Teórico}}{AC_{Real}} \quad (2.16)$$

- $\phi < 1$ mezcla pobre

- $\phi < 1$ mezcla rica
- $\phi = 1$ mezcla estequiométrica

El exceso de aire y el coeficiente de exceso de aire están relacionado con la razón de equivalencia de la siguiente forma [6]:

$$(\%)Exceso_{aire} = \frac{(1 - \phi)}{\phi} \cdot 100 \% \quad (2.17)$$

$$\lambda = \frac{1}{\phi} \quad (2.18)$$

- d) **Temperatura aire combustión:** El precalentamiento del aire requerido para la combustión es utilizado principalmente en calderas que utilizan combustibles sólidos (carbón, madera, biomasa, etc.), ya que, una mayor temperatura del aire de la combustión permite obtener una combustión más completa. Entre los beneficios de este método se tiene: Aumento de la eficiencia del sistema, reducción de las emisiones y menor costo de mantenimiento.
- e) **Tiro:** Se le llama tiro a la diferencia de presión que existe entre los gases de combustión que existe entre los gases del hogar y el ambiente, lo que permite el paso necesario de aire para la combustión. El Tiro puede ser natural, es decir, proporcionado por la chimenea basado en la diferencias de temperaturas entre los gases y el ambiente ó puede ser Tiro Forzado mediante algún sistema artificial.
- f) **Estado de la instalación y suciedad (Incrustaciones):** La suciedad de las superficies de transferencia de calor, denominado incrustaciones, influye de manera significativa en el rendimiento de la caldera. Las incrustaciones producen una capa aislante que se adhiere a las superficies que dificultan la transmisión del calor entregado por el combustible, como se muestra en la figura 2.10. Por esta razón los gases no transmiten todo su calor al agua, disminuyendo el rendimiento.

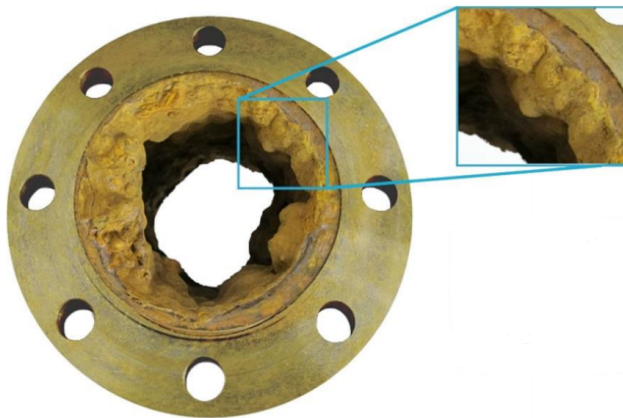


Figura 2.10: Incrustaciones al interior de tubos.

Fuente: www.scalebuster.es

Además, la incrustaciones, provocan un calentamiento excesivo de éstas de las superficies afectadas, las que pueden llegar a perder gran parte de su resistencia sufriendo deformaciones permanentes, roturas y explosiones.

2.6. Quemadores

Los quemadores son equipos responsables de:

- Mezclar adecuadamente el combustible y el aire, para obtener una combustión completa.
- Determinar la forma y dirección de la flama.

2.6.1. Rango del quemador

Una característica muy importante de los quemadores es su rango de operación. Esto se expresa como la relación entre su máxima capacidad (para quemar combustible), dividida entre su mínima capacidad controlable.

El rango de operación no es simplemente el hecho de forzar diferentes cantidades de combustible dentro del hogar de la caldera, sino que es muy importante desde una perspectiva económica y ambiental que el quemador realice una combustión adecuada y eficiente, además de cumplir las regulaciones ambientales dentro de todo su rango de operación.

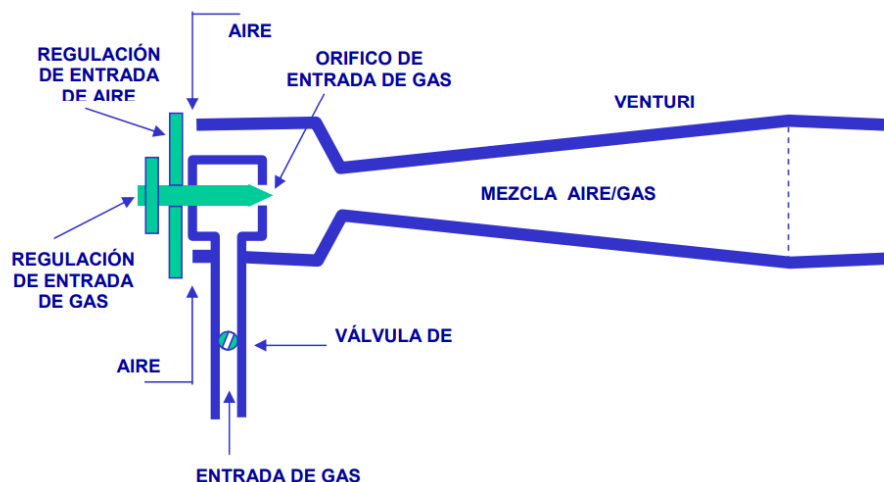
2.6.2. Quemadores para gas

El gas natural es uno de los combustibles más usados en la industria en la mayoría de los países más avanzados. Actualmente, la sustitución de combustible a gas sigue aumentando por sobre otras opciones (combustibles líquidos o sólidos).

Básicamente existen dos tipos de quemadores a gas, de baja y alta presión:

Quemadores a baja presión

Usualmente estos operan entre los 2.5 y 10 mbar. El quemador es un dispositivo tipo venturi simple, al cual se le introduce el gas en la zona de la garganta, mientras que el aire para la combustión es succionado desde la parte posterior por el efecto venturi. La capacidad de éstos quemadores está limitada aproximadamente a 1MW.



Fuente: www.scalebuster.es

Figura 2.11: Quemador a gas a baja presión

Quemadores a alta presión

Éstos operan a presiones mayores, normalmente entre 12 y 175 mbar, y pueden incluir varias toberas para producir una forma particular de la llama.

2.6.3. Sistema de Control

A continuación, se describen brevemente los sistemas de control para quemadores:

Sistema encendido - apagado (ON/OFF)

Este es el más sencillo de los sistemas de control; el quemador está encendido a su máxima capacidad, o completamente apagado. La mayor desventaja de éste método de control radica en que la caldera se somete a choques térmicos bruscos, cada vez que el quemador enciende.

Sistemas de control fuego alto y bajo

Éste es un sistema de control un poco más complejo que el anterior y en el que el quemador puede trabajar a dos rangos de fuego. En un principio, el quemador opera a fuego bajo y, posteriormente de acuerdo con los requerimientos, cambia a fuego alto. De esta manera, se evita peligro de choques térmicos. El quemador también puede regresar a la operación en fuego bajo cuando la carga se reduce, limitando de nuevo los esfuerzos térmicos en la caldera.

Sistemas de control modulante

Éstos sistemas varían el rango de fuego, de los quemadores de acuerdo con la demanda de la caldera en todo rango del quemador. Cada vez que el quemador se apaga y vuelve a encenderse, el sistema debe ser purgado mediante el suministro de aire frío a través de todos los pasajes de la caldera. Esto gasta energía y reduce la eficiencia. Sin embargo, la modulación completa significa que la caldera se mantiene encendida dentro de todo su rango de potencia maximizando su eficiencia térmica y reduciendo los esfuerzos térmicos.

Capítulo 3

Proceso de estudio

3.1. Partes principales equipo

A: Estanque almacenamiento principal

Estanque encargado de almacenar la mezcla líquida de fungicida en agua a una concentración específica que será rociada al flujo de cítricos en la línea de manipulación. Al interior del estanque se encuentra el intercambiador de calor por el cual circulan los gases de combustión producido por el combustible. Además, posee un hélice mezcladora en el fondo accionado por un motor.

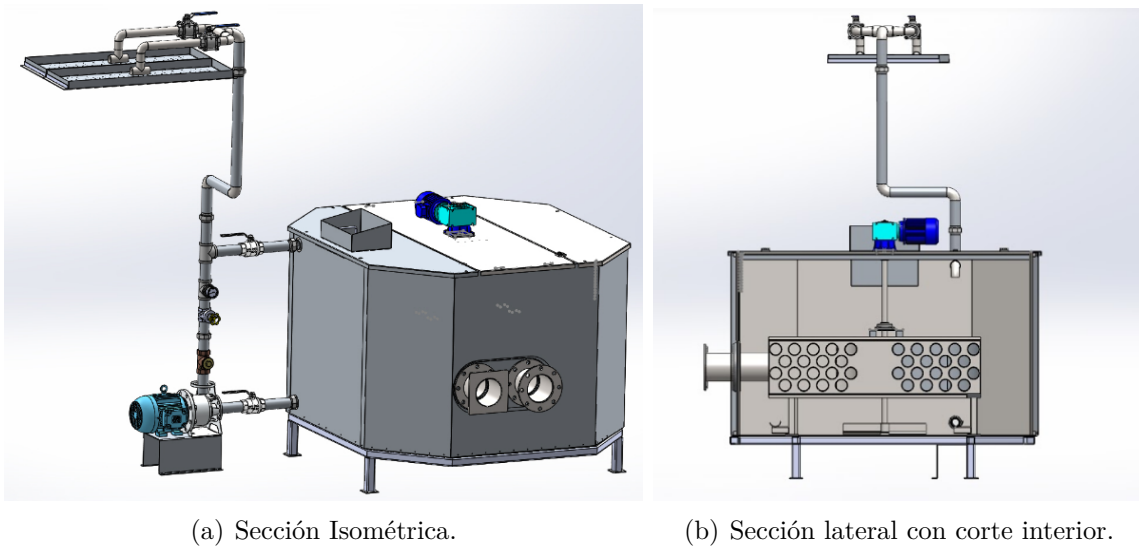


Figura 3.1: Modelo 3D de equipo "HEAT".

Fuente: MAF CHILE

El estanque posee una forma volumétrica de base octagonal y está fabricado completamente de acero inoxidable con una capacidad de 1300 [L] efectivos de líquido. No posee aislación de algún tipo. La dimensiones del estanque se pueden ver en el Apéndice B.

B: Estanque de reposición fungicida

Estanque con mezcla concentrada de fungicida que abastece al estanque de almacenamiento cuando ha perdido líquido debido al arrastre de fruta, evaporación, fugas, etc. Este estanque, de menor capacidad que el estanque principal, tiene una concentración mayor que la que debe suministrarse a los cítricos. Es por esto, que posee un sistema electrónico para entregar el flujo con la concentración adecuada.

C: Intercambiador de calor

Equipo encargado para transferir calor desde los gases de combustión del gas al líquido fungicida. Se encuentra al interior del estanque principal.



Figura 3.2: Intercambiador de calor del equipo

Fuente: Johann Schwarze

Tal como muestra la Figura 3.2, el intercambiador está compuesto de tres cavidades de acero inoxidable redondeadas en las esquinas con el objetivo que los gases de combustión permanezcan un tiempo prologando. Estas cavidades son comunicadas con dos secciones de 18 tubos de acero inoxidable en paralelo, con la finalidad de una mejor transferencia de calor. Del mismo modo, se disponen por fuera de las cavidades múltiples aletas que ayudan a cumplir el mismo propósito.

D: Bomba de circulación de líquido

Bomba centrífuga con rodete radial encargada de impulsar el líquido desde el fondo del estanque hasta los tubos de salida.

E: Sistema electrónico de estanque de reposición

Este sistema electrónico es el encargado de suministrar el líquido faltante desde el estanque de suministro externo al estanque de almacenamiento principal. Está compuesto una válvula 3/2 y niveles tipo flotador que mandan la señal de accionamiento. Así mismo posee un sistema electrónico que regula el caudal de fungicida según la concentración deseada en el estanque principal.

F: Quemador

Equipo encargado de entregar la energía de calentamiento a través de la combustión del combustible (gas) y aire u oxígeno. El sistema utiliza un quemador marca Riello con funcionamiento a dos llamas progresivas (ver Tabla 4.1), con una potencia de trabajo mínima de 45 [KW] y máxima de 390 [KW].



Figura 3.3: Quemador de gas conectado al estanque de almacenamiento y tubo de salida de gases de escape

Fuente: Johann Schwarze

3.2. Funcionamiento y estado del sistema

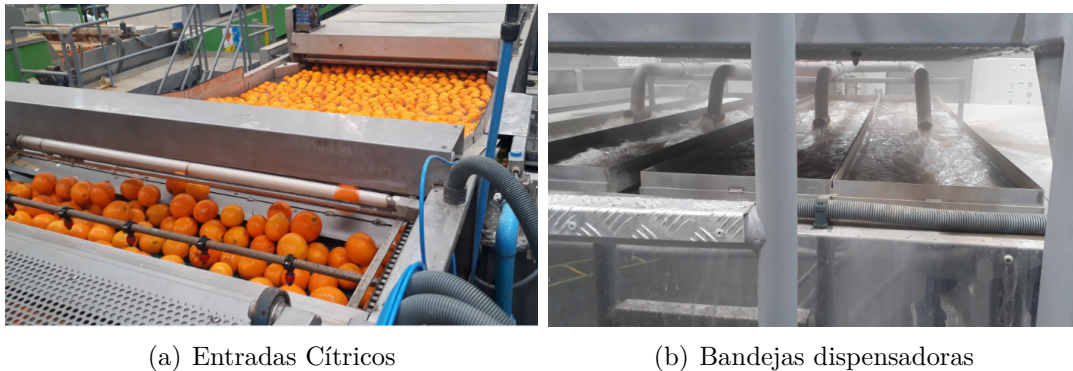
Para este trabajo el equipo a estudiar es el denominado "Heat" de la empresa Maf Chile, un equipo instalado en la exportadora Santa Cruz S.A. comuna de Pudahuel.

Este equipo es parte de la línea de manipulación de cítricos instalados en el packing Santa Cruz de los cuales Maf Chile realiza servicios de mantenimiento en las líneas de automatización para procesamiento de frutos de exportación, desde su instalación hace alrededor de un año atrás. El equipo "Heat", ubicado entre las secciones de lavado y encerado de frutas, está encargado de entregar un líquido fungicida a una concentración y temperatura específica a un flujo de frutos cítricos (naranja para este proyecto). El equipo funciona mediante el sistema de aplicación on-line detallado en el capítulo anterior.

El líquido utilizado sobre los cítricos es el denominado Imazalil que se aplica a una concentración de 0.27 [ml/L] y una temperatura aproximada de 40°C. Este líquido tiene una función de esterilización como se mencionó en la sección 2.3.2.

El proceso comienza con el llenado del estanque principal (1300 Litros) de la mezcla fungicida manteniendo los parámetros previamente dichos. A continuación se calienta el líquido, debido al calor transferido por la combustión del gas, a una temperatura promedio de 40°C para luego ser

impulsado mediante una bomba centrífuga que tiene la toma del líquido en la parte inferior del estanque (al nivel del suelo) a la zona de la línea manipulación de los cítricos (una altura de 2,4 [m]). Es aquí, donde la tubería principal se subdivide en 8 tubos que distribuyen el flujo en 4 bandejas agujeradas que entregan el fluido de manera de lluvia por todo el ancho de la línea de circulación de cítricos (ver Figura 3.4), finalmente el flujo fungicida ya utilizado retorna por una tubería al estanque principal impulsado por gravedad. Es necesario decir que parte del flujo se pierde por arrastre de los cítricos y la tubería de retorno tiene una sección con malla para evitar una contaminación por elementos extraños al estanque principal.



(a) Entradas Cítricos

(b) Bandejas dispensadoras

Figura 3.4: Aplicación de fungicida en cítricos.

Al mismo tiempo que circula el líquido, está en funcionamiento un quemador que entrega el calor gracias a la combustión de gas GLP (ver Apéndice A, para composición de GLP). Este calor se entrega mediante la circulación de los gases a través de un intercambiador de calor ubicado al interior del estanque, posteriormente estos gases son evacuados por una segunda sección y enviados a la atmósfera mediante una tubería hacia el exterior.

Durante este proceso existe una pérdida de líquido fungicida debido al arrastre de los cítricos y la evaporación por calentamiento, para esto se utiliza un segundo estanque de menor capacidad junto al estanque principal con una concentración de 10 [ml/L] a un caudal de 25[L/min] que abastece al estanque principal y mediante un sistema de válvulas conectadas a los niveles de tipo flotador de altura máxima y mínima definida, que permiten el encendido y pagado del sistema de suministro externo. Además, existe un sistema plc que regula la cantidad de fungicida concentrado que ingresa al estanque según el flujo de agua que proporciona la red de la empresa para alcanzar la concentración adecuada de trabajo. El sistema con el uso de flotadores está configurado para que el estanque pueda perder un máximo de 125 [L]

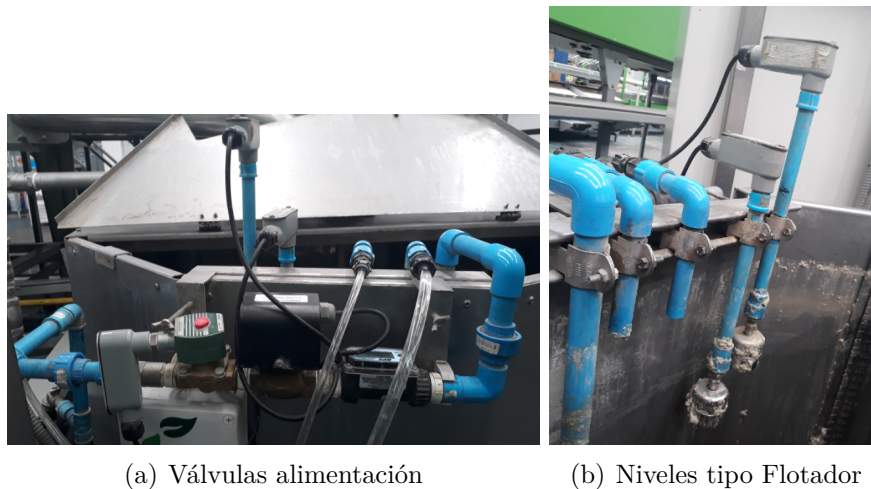


Figura 3.5: Sistema de alimentación externo.

El equipo actualmente trabaja de 2 a 3 días seguidos como máximos en jornadas de 21 hrs aproximadamente según la demanda de frutas existentes. Debido a la contaminación inevitable del líquido por la circulación cerrada de la mezcla en el sistema, luego de revisiones periódicas, cumplido el plazo máximo o el criterio del supervisor a cargo se vacía el estanque para su limpieza y mantenimiento y se utiliza un equipo idéntico al costado previmante preparado que se conecta a las mismas tuberías del la línea. Esto permite que ante cualquier falla el sistema posee respaldo y evita un daño por sobre uso o contaminación no deseada.

De acuerdo a informes de personal de mantenimiento los equipos no han tenido fallas considerables desde sus marcha inicial hace aproximadamente 1 año y el equipo tiene un buen funcionamiento. Es por esto que la fundamental preocupación es la temperatura alcanzada por el líquido de trabajo.

Tal como se mencionó en el capítulo 1, uno de los principales problemas que se encuentra en este trabajo es el desconocimiento profundo del funcionamiento del equipo completo junto con la identificación y capacidad de monitoreo de variables que explican el proceso. Esto es debido, a que la instalación del sistema no fue realizada completamente por Maf Chile. Para la instalación del quemador de gas se solicitó los servicios de un externo (Serprogas) y el quemador elegido fue de acuerdo a los disponibles de la empresa externa y tomando referencias de otros equipos similares, sin la determinación analítica adecuada.

Por otro lado el desarrollo e instalación del sistema de alimentación de fungicida externo fue realizado por la empresa Santa Cruz asociada a un tercero.

De modo que, es complejo recopilar información de acuerdo a las jornadas de trabajo del equipo que no pueden ser interrumpidas por el flujo constante de producto (cualquier tiempo de detención de la línea provoca un retraso en el despacho del producto final y pérdidas monetarias para el cliente). Además, no se posee información por los equipos instalados por otras empresas y el acceso a ellos son limitados.

Por ende, las pruebas necesarias para la evaluación del equipo deben ser realizadas de manera no invasiva, para no afectar la producción de la línea de manipulación y que permita tener resultados fiables.

3.3. Flujo de Producción

Los flujos de producción en la línea de manipulación varían según distintas variables de corto y largo plazo. Entre las variables más significativas podemos mencionar:

- Temporada o fecha específica
- Tipo de fruto
- Condiciones externas, ya sean medioambientales (desastre natural) o económicas (oferta y demanda)

Sin embargo, aunque los valores no son constante durante el tiempo, existe un flujo promedio constante para una temporada específica de acuerdo al tipo de fruto. Dentro de las frutas que se procesan en Santa Cruz podemos destacar los siguientes flujos actuales de producción:

Tabla 3.1: Flujos de producción año 2019.

Fruto	Peso medio [gr]	Flujo [Bin/hora]	Peso del Bin [kg]
Limón	120	70	380
Aguacate	200	40	400
Naranja	265	90	380
Mandarina	80	80	380

Fuente: Maf Chile

En la Tabla 3.1, la unidad utilizada para el flujo de fruta en la línea de producción es [bin/H]. Un bin es un contenedor plástico en el que es entregada la fruta al inicio de la línea. Estos contenedores son volcados en el inicio del proceso. Tomando en cuenta el peso del bin vacío y el flujo de la tabla se puede expresar el flujo promedio de frutas de forma másica como [Ton/hora]. Por lo tanto los flujos quedan expresados como:

Tabla 3.2: Flujos de producción año 2019.

Fruto	Flujo [Ton/h]
Limón	26.6
Aguacate	16
Naranja	34.2
Mandarina	30.4

Fuente: Maf Chile

Capítulo 4

Metodología de trabajo

4.1. Recolección de información

La información necesaria para la realización de este proyecto se obtiene a través de técnicas de observación directa y por medio del uso de instrumentos de medición, con la finalidad de cuantificar las distintas variables y poder, en una siguiente etapa, procesar y analizar esa información que permita completar los objetivos designados para este trabajo.

Este procedimiento experimental se subdivide en las siguiente etapas:

- a) Medición de temperaturas de la mezcla líquida de fungicida del estanque con quemador en funcionamiento durante un tiempo determinado.
- b) Identificación de funcionamiento del quemador.
- c) Medición de variables de composición y temperatura en gases de escape con equipo en marcha.
- d) Medición de duración del proceso antes del llenado de mezcla de reposición.
- e) Determinación de calor específico de la mezcla fungicida.

4.1.1. Medición de temperatura líquido fungicida en estanque principal.

Objetivo: Realizar un seguimiento y registro de la temperatura de la mezcla líquida al estanque principal durante un tiempo determinado.

Para poder determinar el calor que requiere el estanque principal de fungicida es necesario saber cuales son los límites de temperatura máximo y mínimo que se alcanza en el estanque en su funcionamiento normal.

Para esto, se planifica registrar en 3 jornadas distintas, a una misma hora, los valores de temperatura de la mezcla líquida del estanque principal cada 10 segundos durante un lapso de tiempo de 20 minutos, es decir, en cada registro habrán 120 mediciones.

Además se registra la temperatura ambiente, temperatura de entrada de cítricos y flujo másico de cítricos en la líneas de producción para cada jornada.

4.1.2. Identificación de funcionamiento del quemador.

Objetivo: Identificar el modo de operación del quemador y comprender su funcionamiento para determinar rango de la potencia de trabajo.

Como se mencionó en el capítulo 3, el quemador posee un amplio campo de trabajo con un funcionamiento a 2 llamas (alta y baja llama) o 1 llama (todo o nada). Sin embargo, se desconoce la configuración elegida para su uso. Es por esto, que con personal capacitado y autorizado, se desmonta la carcasa del equipo y se verifica su funcionamiento sin alterar las variables configuradas ya que el equipo se revisa en horario de actividad.

Tabla 4.1: Extracto de especificaciones técnicas Quemador Riello Rs 34 MZ.

Marca	Riello		
Modelo	RS 34 MZ		
Potencia	2ª llama	kW	125 - 390
	1ª llama min	kW	45
Funcionamiento	• Intermitente (mín. 1 paro en 24 horas).		
	• 2 llamas (alta y baja llama) o 1 llama (todo - nada)		

Al desmontar el equipo, se identifica la regulación del quemador de los interruptores de la puesta en marcha según lo que informa el catálogo técnico.



(a) Quemador sin Carcaza

(b) Posición interruptor selección de llama

Figura 4.1: Verificación estado del quemador.

Por lo tanto, de la revisión del quemador, se verifica lo siguiente:

- EL quemador funciona en una sola llama de manera on / off con una potencia estimada entre 45 y 120 [kW], según el catálogo del proveedor. (Ver Apéndice C).
- Los rangos de encendido y apagado ocurren a los $38^{\circ}C$ y $40^{\circ}C$ respectivamente.
- Al encender el quemador se inicia un prebarrido de aire durante los primeros 15 segundos.
- No se puede determinar el consumo de combustible, ya que el quemador no posee un contador de caudal ni medidores de presión al interior de la cámara de combustión.

4.1.3. Medición de variables de gases de escape

Objetivo: Medir las variables de combustión relacionadas a los gases de escape.

De la misma forma que para la revisión del quemador es necesario un personal capacitado y autorizado para la evaluación de gases junto con un instrumento adecuado. Con esta información se podrá determinar el calor que desprende el sistema por los gases de combustión.

Las mediciones son realizadas durante el periodo del encendido del quemador (posterior al prebarrido) y se registran la información cuando se estabilizan los datos en el analizador.

El proceso de medición comienza, cuando el quemador está en proceso de combustión, es decir, cuando la luz amarilla (proceso de prebarrido de aire) junto a los interruptores de selección de llama (ver Figura 4.1 (b)), cambia a color verde (proceso de combustión). En ese momento, se miden con los gases con una sonda y un analizador en la tubería de salida de gases (Ver Figura 4.2). Se registran los datos cuando en el display del instrumento se estabilizan.

Para esta evaluación se utiliza un analizador de gases Testo 340, un medidor manual para mediciones de emisiones industriales, que permite medir concentraciones de distintos gases entre ellos O_2 , CO_2 y CO , además de presión y temperatura.



Figura 4.2: Medición de gases de escape

4.1.4. Medición del tiempo de proceso antes del llenado de reposición

Objetivo: Determinar el tiempo que transcurre desde el inicio del proceso durante una jornada, hasta el momento que se activa la válvula de acceso a líquido de reposición del estanque secundario.

Debido a que el equipo produce pérdidas de la mezcla fungicida por evaporación y arrastre, se desea cuantificar esta variable en función del caudal de cítricos que circulan por la línea de manipulación.

Para conocer esta información, es necesario saber el tiempo que transcurre entre cada encendido de la válvula del suministro de fungicida de reposición. Sin embargo, no es posible conectar un dispositivo eléctrico a la válvula para guardar la información de encendido ni tampoco conectar a la red de donde obtiene energía, ya que este equipo fue instalado por otra empresa y no permite manipulación de su sistema. Además la empresa dueña del equipo Santa Cruz, no accede a soluciones para no afectar la garantía de su producto.

Debido a estas dificultades, es necesario utilizar un dispositivo que pueda almacenar la información de manera que no interfiera con el resto de los equipos y además, tenga autonomía energética.

Por tanto como parte de este trabajo, se diseña y fabrica un instrumento electrónico que permitiera esta medición. El diseño consiste en un instrumento electrónico que detecte y registre automáticamente los instantes (tiempo) cuando se produce paso de corriente eléctrica por la fase de un cable (sin necesidad de desconectar y/o intervenir el cable). Los valores registrados fueron la hora del inicio y detención de corriente.

El circuito principal que es utilizado por el dispositivo para la detección de la corriente (Figura 4.3), es de fácil montaje y depende principalmente de los siguientes componentes:

- 3 transistores
- 3 resistencias
- 1 diodo led
- 1 batería
- 1 alambre de cobre para antena

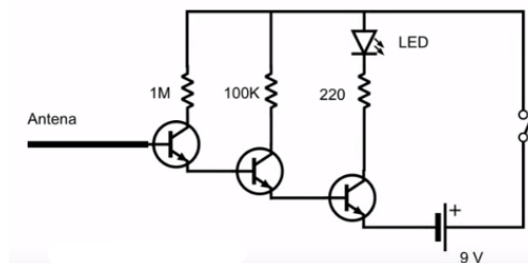


Figura 4.3: Diagrama eléctrico de detector de corriente.

Además, se requiere un sensor capaz de leer la señal por el detector de corriente, en este caso se utiliza un sensor de luz con módulo LDR (Light-dependent resistor). Un LDR es un dispositivo

cuya resistencia varía de acuerdo a la cantidad de luz que reciba. Este módulo posee una salida digital que puede estar en dos estados: encendido/apagado, el cambio de un estado a otro depende del umbral que se fije con el potenciómetro del módulo.

Este equipo es conectado de tal manera que la fotoresistencia del sensor este lo más cercano posible a la luz led del detector de corriente del circuito mencionado.

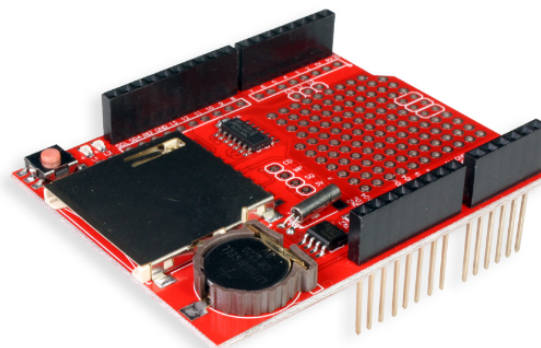


Figura 4.4: Modulo detector de luz con fotodetector LDR

Finalmente, para el guardado de la señal se opta por la utilización de un microcontrolador Arduino uno (Figura 4.5 (a)), que permite múltiples uso de sensores que son útiles para la realización de esta medición. Además, de una placa con un zócalo para tarjeta sd con funciones de almacenamiento y un reloj de tiempo real (Figura 4.5 (b)) que mantiene la fecha aún cuando el arduino está desconectado.



(a) Arduino uno



(b) Arduino SD card shield

Figura 4.5: Tarjeta electrónicas utilizadas

En el Apéndice E, se puede ver la realización propia del código en el software arduino y el montaje final del conjunto.

Esta experimentación se realiza para tres jornadas, en las mismas fechas que las realizadas en el punto 4.1.1.

4.1.5. Determinación del calor específico de la mezcla fungicida.

Objetivo: Determinar una aproximación del calor específico de la mezcla fungicida con agua utilizada en el proceso.

Debido a que no existe información del calor específico de la mezcla se decide tomar de una muestra durante una jornada de la experimentación de gases de escape y esta misma obtener una aproximación adecuada.

Para esto se utiliza un calorímetro artesanal y una fuente de calor constane (quemador de gas de cocina). El desarrollo de este cálculo se realiza en la siguiente sección.

4.1.6. Instrumentos de medición utilizados

A continuación se muestran los instrumentos utilizados para la recolección de información.

Analizador de gases



Figura 4.6: Analizador de gases Testo 340.

Cronómetro

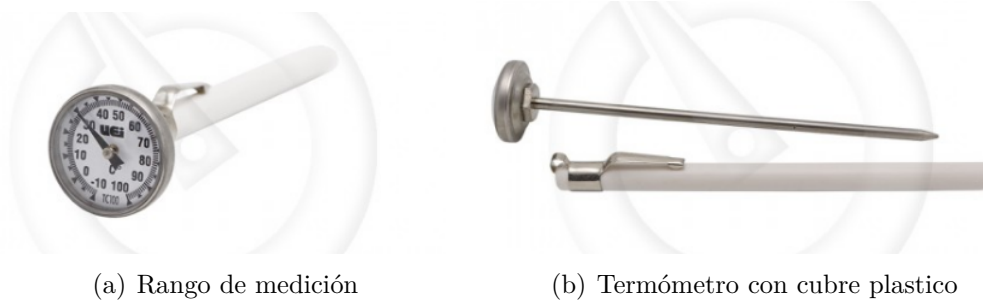
Es un reloj o una función del reloj para medir fracciones temporales, normalmente breves y precisas en el tiempo.



Figura 4.7: Cronómetro.

Termómetro de pinchar

Termómetro de pinchar bimetalico. Posee rango de medición de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y cuerpo metálico. Se puede utilizar en distintas actividades: agrícolas, laboratoria, industria alimentaria, procesos industriales.



(a) Rango de medición

(b) Termómetro con cubre plastico

Figura 4.8: Termómetro de pinchar T160

Multímetro digital



Figura 4.9: multímetro digital Truper.

4.1.7. Formato de Medición

Como se mencionó en este capítulo, se requieren varias mediciones como mínimo para realización de este trabajo. Debido a las condiciones y restricciones de las empresas involucradas junto con la disponibilidad del equipo a evaluar e instrumentos de medición, se opta por realizar una distribución de las mediciones en varias jornadas. La forma escogida se define de la siguiente manera:

Tabla 4.2: Formato de distribución de mediciones

Tipo de medición	Jornada 1	Jornada 2	Jornada 3
T° estanque principal	1 Registro	1 Registro	1 Registro
Variables de gases de escape	-	-	3 Registros
Tiempo de vaciado de estanque	1 registro	1 Registro	1 Registro

Es necesario decir, que la identificación del funcionamiento del quemador es realizado en conjunto a la medición de las variables de gases de escape. Por otro lado, la determinación del calor específico de la mezcla líquida de fungicida no aparece en la tabla, ya que no requiere realizarse la experimentación in situ.

4.2. Procesamiento de información

Para poder caracterizar el fenómeno de calentamiento del fluido, se lleva a cabo la siguiente metodología, la cual tendrá como objetivos determinar las variables, considerando un volumen de control fijo. Luego, utilizar indicadores de análisis y finalmente determinar la potencia de trabajo del quemador en el estado actual y otros escenarios de producción.

4.2.1. Balance másico

En primer lugar se define como volumen de control, el intercambiador de calor del equipo es decir, la cavidad donde se efectúa la combustión y donde circulan los gases hacia la salida del equipo. De lo anterior, tomando el volumen de control como una caja negra, podemos realizar un balance de masa tomando los flujos que ingresan por el quemador y el flujo saliente de los gases de escape:

$$\dot{m}_{GLP} + \dot{m}_{aire} = \dot{m}_{GE} \quad (4.1)$$

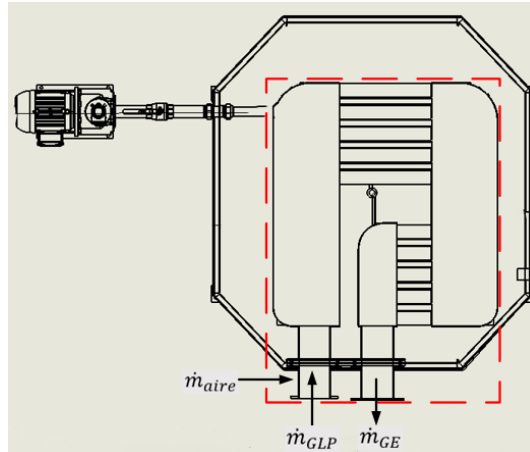


Figura 4.10: Balance másico en el intercambiador de calor.

\dot{m}_{GLP} = Flujo másico de combustible (GLP) que ingresa a la cámara de combustión.

\dot{m}_{aire} = Flujo másico de aire que ingresa a la cámara de combustión.

\dot{m}_{GE} = Flujo másico de gases de escape.

Cálculo de flujo másico de combustible GLP

El flujo másico de combustible se puede definir como:

$$\dot{m}_{GLP} = \rho_{GLP} \cdot \dot{V}_{GLP} \quad (4.2)$$

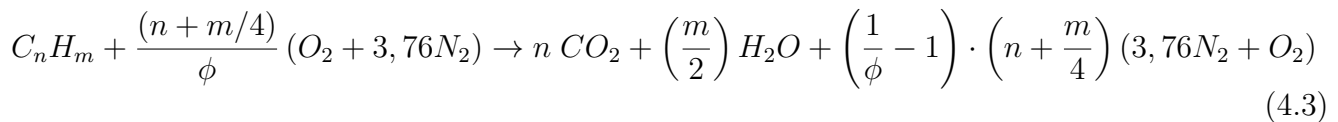
ρ_{GLP} = Densidad del GLP

\dot{V}_{GLP} = Flujo volumétrico de GLP.

Obtención de Datos: Para poder determinar el flujo másico de combustible es necesario tener un controlador de flujo para medir el caudal de de GLP. Sin embargo, no se posee el instrumento por lo que no es posible obtener este dato directamente y será calculado de manera indirecta mediante el balance energético.

Cálculo de flujo másico de aire

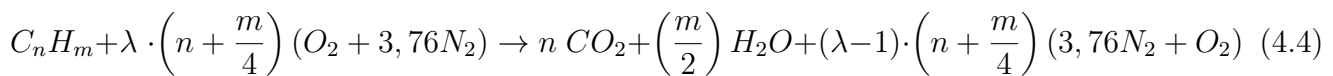
Para este caso se considera una combustión en la cual existe una cantidad de aire superior a la estequiométrica. Esta combustión tiende a no producir inquemados. Es típica la presencia de O_2 en los humos. El balance químico [7] que representa esta combustión es la siguiente:



Donde: $\phi < 1$. Corresponde a la relación de equivalencia.

$C_n H_m$ = Molécula de hidrocarburo con "n" átomos de carbono y "m" átomos de hidrógeno

De acuerdo a lo visto en la sección 2.5.5, $\frac{1}{\phi} = \lambda$, por lo que:



Donde:

λ = Coeficiente de exceso de aire ($\lambda > 1$)

El coeficiente molar para el aire de la ecuación 4.3 se obtiene desde la composición volumétrica del aire seco. Se sabe que el aire en promedio está compuesto por un 20,9 % de oxígeno, 78,1 % de nitrógeno, 0,9 % de argón y pequeñas cantidades de dióxido de carbono, helio, neón e hidrógeno.[8]

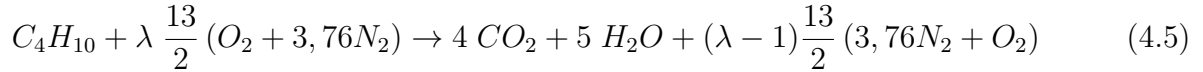
De acuerdo a lo anterior, en el aire seco las cantidades muy pequeñas pueden descartarse, de modo que se considera solamente al oxígeno y nitrógeno como parte de su composición. Por consiguiente, cada mol de oxígeno que entra en una cámara de combustión será acompañado por:

$$0,79/0,21 = 3,76 \text{ kmol de nitrógeno.}$$

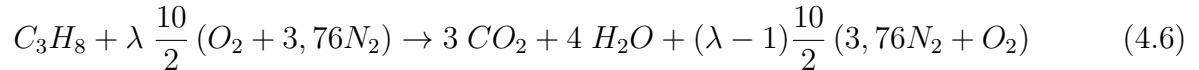
Es decir, la cantidad de moles de aire requerido para 1 mol de combustible es;

$$1 \text{ kmol } O_2 + 3,76 \text{ kmol } N_2 = 4,76 \text{ kmol aire}$$

Para este trabajo se considera el uso de gas GLP como combustible con una composición volumétrica de 97% propano y 3% butano. Por lo tanto, según la ecuación 4.3 el balance para el butano es:



Del mismo modo para el propano:



Considerando un valor arbitrario de 100 kmol/kg de combustible (3 kmol de butano y 97 kmol de propano según la proporción volumétrica), la masa de aire que entra a la cámara de combustión es:

$$m_{aire} = \lambda \cdot (4,76 \text{ kmol}) \cdot (3 \cdot \frac{13}{2} + 97 \cdot \frac{10}{2}) \cdot M_{aire} \quad (4.7)$$

Donde:

MM_{aire} = Peso molecular del aire en (kg/kmol)

Por otra parte la masa del combustible se determina de manera similar:

$$m_{GLP} = 3 \text{ kmol} (4 \cdot M_C + 10 \cdot M_H) + 97 \text{ kmol} (3 \cdot M_C + 8 \cdot M_H) \quad (4.8)$$

Donde:

MM_C = Peso molecular del carbono en (kg/kmol)

MM_H = Peso molecular del hidrógeno en (kg/kmol)

Con estos valores se puede obtener la relación aire combustible de la ecuación (2.15):

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{GLP}}$$

Finalmente se puede obtener el flujo másico de aire como:

$$\dot{m}_{aire} = AC \cdot \dot{m}_{GLP} \quad (4.9)$$

Obtención de Datos: Para poder determinar el flujo másico de aire se requiere el flujo másico de combustible y el coeficiente del exceso de aire (λ). El flujo másico de combustible se determina desde el balance energético, mientras que el coeficiente de exceso de aire se obtiene desde el analizador de gases de combustión.

Cálculo de flujo másico de gases de escape

Obtención de Datos: Para la obtención de datos se realiza directamente de la ecuación 4.1 del balance másico.

4.2.2. Balance energético

Para la realización del balance energético, se consideran el flujo de calor que ingresa debido a la combustión del gas y los flujos de calor que salen del intercambiador y son entregados al exterior como gases de escape y calor entregado al líquido fungicida para su calentamiento, además de las pérdidas del sistema. De la misma forma que para el balance másico se considera una caja negra el contorno del intercambiador calor.

$$\dot{Q}_{GLP} + \dot{Q}_{aire} = \dot{Q}_{fung} + \dot{Q}_{GE} + \dot{Q}_{pérdidas} \quad (4.10)$$

Donde:

\dot{Q}_{GLP} = Flujo de calor debido a la combustión del GLP.

\dot{Q}_{aire} = Flujo de calor aportado por el aire.

\dot{Q}_{fung} = Flujo de calor utilizado en el calentamiento de la mezcla líquida de fungicida.

\dot{Q}_{GE} = Flujo de calor debido a pérdidas de gases de escape.

$\dot{Q}_{pérdidas}$ = Flujo de calor debido a otras pérdidas.

De la sección 2.4.3, el calor aportado por el aire se calcula de la diferencia de entalpía sensible y la entalpía de referencia estándar. Como las condiciones ambientales (entre 24°C y 25° aproximadamente) son cercanas a las de referencia estándar, el valor del calor aportado por el aire se puede aproximar a 0. De acuerdo a lo mostrado en la ecuación 2.7, el balance energético queda expresado como:

$$\dot{m}_{GLP} \cdot PCI = \dot{Q}_{fung} + \dot{Q}_{GE} + \dot{Q}_{pérdidas} \quad (4.11)$$

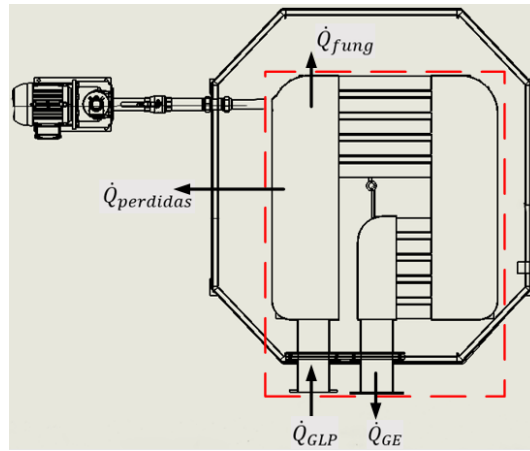


Figura 4.11: Balance másico en el intercambiador de calor.

De la ecuación 4.9 se puede obtener el flujo másico de combustible y la potencia de calentamiento del quemador. Previamente se explicará como determinar las otras variables relacionadas.

Cálculo de calor transferido al líquido fungicida

Previamente para la determinación del calor transferido al líquido fungicida, se debe saber el valor de densidad de la mezcla agua-fungicida de acuerdo a la concentración utilizada. La densidad de una mezcla se define de la siguiente manera:

$$\rho_{mezcla} = \frac{m_{fung} + m_{agua}}{V_{total}} \quad (4.12)$$

Donde:

ρ_{mezcla} = Densidad de la mezcla $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

m_{fung} = Masa de fungicida $[kg]$

m_{agua} = Densidad del agua $[kg]$

V_{total} = Volumen total de la mezcla $[m^3]$

Es necesario decir que para determinar la masa de liquido fungicida se debe realizar en función de la concentración en la mezcla, es decir:

$$m_{fung} = X_{fung} \cdot V_{total} \cdot \rho_{fung} \quad (4.13)$$

X_{fung} = Es la concentración del fungicida $[ml/litro]$

ρ_{fung} = Densidad del fungicida, según Apéndice D. Determinada la densidad de la mezcla, la relación para conocer el calor transferido al líquido fungicida es:

$$\dot{Q}_{fung} = \frac{m_{fung} \cdot C_{pmezcla} \cdot \Delta T^{\circ}}{\Delta t} [kW] \quad (4.14)$$

Donde:

ΔT° = Es la variación entre la temperatura máxima y mínima que alcanza la mezcla del fungicida en el estanque principal.

Δt = Es el tiempo promedio que se utiliza.

Donde las constantes para cada especie se encuentran en el Apéndice F.

Por otro lado para la determinación del calor específico de la mezcla se opta por el uso de un calorímetro, usando una fuente de calor constante previamente determinada, para así al provocar una variación de temperatura en la mezcla líquida se pueda obtener el poder calorífico de la misma. La relación que expresa este fenómeno es:

$$Cp_{mezcla} = \frac{\dot{Q}_{aplicado}}{m_{mezcla} \cdot \Delta T_{experimental}} \quad (4.15)$$

Es necesario aclarar que el $\Delta T_{experimental}$ se escoge de acuerdo a la experimentación con un valor de $T_{experimental} = 5^\circ\text{C}$.

Obtención de Datos: El valor ΔT° para el cálculo \dot{Q}_{fung} se obtiene de la experimentación para la tercera jornada de medición y el calor específico se obtiene de una experimentación externa mediante el uso de un calorímetro.

Cálculo de calor de gases de escape

En primera instancia se debe determinar la composición de los gases de escape. Para esto se necesita determinar el Volumen de aire estequiométrico de aire y el exceso de aire en la combustión. [10]

El volumen de aire estequiométrico se obtiene como:

$$V_{a,e}^0 = \frac{22,4}{0,21} \left(\frac{x_C}{12,01} + \frac{x_H}{4,032} - \frac{x_O}{321} \right) \left[\frac{m_N^3}{kg} \right] \quad (4.16)$$

La relación para obtener el coeficiente de exceso de aire [11] para analizadores de gases Testo esta definida como:

$$Exceso_{aire} = K \cdot \left(\frac{21}{21 - \% O_2} - 1 \right) \cdot 100 \% \quad (4.17)$$

$$\lambda = 1 + Exceso_{aire} \quad (4.18)$$

Donde:

$\% O_2$ en base seca (Obtenido del analizador)

K = 0.9 para Gas

Con estos datos, la composición de los gases de escape es decir, el número de moles de los gases de escape resulta:

$$\begin{aligned}
 N_{CO_2} &= \frac{X_C}{12,01} \cdot \varphi \left[\frac{kmol}{kg\ comb} \right] \\
 N_{O_2} &= \frac{X_H}{2,016} \left[\frac{kmol}{kg\ comb} \right] \\
 N_{H_2O} &= \frac{\lambda \cdot (1 - \beta)}{22,4} \cdot V_{a,e}^0 \left[\frac{kmol}{kg\ comb} \right] \\
 N_{N_2} &= \frac{(\lambda - 1)\beta}{22,4} \cdot V_{a,e}^0 \left[\frac{kmol}{kg\ comb} \right] \\
 N_{CO} &= \frac{X_C}{12,01} \cdot (1 - \varphi) \left[\frac{kmol}{kg\ comb} \right]
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

Donde:

$$\varphi = \frac{y_{CO_2}}{y_{CO} + y_{CO_2}}$$

$\beta = 0,21$. Correspondiente a la fracción de oxígeno en el aire.

Finalmente la expresión para conocer el valor de calor desprendido en los gases de escape es:

$$\dot{Q}_{GE} = \dot{m}_{GLP} \cdot \left(\sum_k^5 N_k \cdot Cp_k \right) \cdot \Delta T \left[\frac{kJ}{kg} \right] \tag{4.20}$$

Donde:

n_k = número de moles de las especie k de los gases de escape.

Cp_k = poder calorífico de las especies k de los gases de escape.

ΔT = a la diferencia entre la temperatura del los gases de escape a la salida del sistema y la temperatura ambiente ($25^\circ C$).

Es necesario decir que para determinar los valores del poder calorífico de las especies de los gases de escape a la temperatura de salida está definida por:

$$Cp = (a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3) \left[\frac{kJ}{kmol\ K} \right] \tag{4.21}$$

Obtención de Datos: Mediante las fracciones másicas de CO , CO_2 y O_2 junto con las temperaturas de los resultados del analizador de gases.

Estimación pérdidas del sistema

Al no tener implementos mínimos necesarios para la determinación analítica de las pérdidas del sistema intercambiador-estanque (como presión interna de la cámara, temperaturas de la pared del intercambiador, velocidad de gases de combustión, etc), es preferible utilizar una aproximación que nos permita estimar el valor adecuado de acuerdo al sistema que estamos evaluando.

De acuerdo a la asociación Chilena de seguridad (ACHS) en "Potencia y Rendimiento de Calderas"[12], dentro de los factores que influyen en las pérdidas para una caldera ,con gas de combustible, teniendo un rendimiento aproximado de 70 %, son los siguientes:

- Por combustión incompleta: 9,8 %
- Por gases de combustión: 14 %
- Por cenizas escorias: 2,85 %
- Por radiación y otras causas: 3,35 %

Por lo tanto ya considerada la combustión y los gases de escape, podemos afirmar que por pérdidas una aproximación adecuada sería un 5 % del calor entregado por el combustible debido a radiación, cenizas y otras causas.

Cálculo de flujo másico de GLP y potencia de trabajo del quemador

Con las relaciones anteriores 4.14, 4.19 y el balance energético de la ecuación 4.11 se puede determinar el flujo másico de combustible de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{GLP} \cdot PCI &= \dot{Q}_{fung} + Q(\dot{m}_{GLP})_{GE} + Q(\dot{m}_{GLP})_{p\acute{e}rdidas} \\ \dot{m}_{GLP} \cdot PCI &= \dot{Q}_{fung} + Q(\dot{m}_{GLP})_{GE} + 0,05 \cdot \dot{m}_{GLP} \cdot PCI \end{aligned} \quad (4.22)$$

De la ecuación 4.21 se podrá obtener el flujo másico de combustible.

Finalmente la potencia de trabajo se calcula como:

$$\dot{Q}_{quemador} = \dot{m}_{GLP} \cdot PCI_{GLP} [kW] \quad (4.23)$$

4.2.3. Indicadores

Se consideran los siguientes indicadores para la evaluación del proceso:

- **Eficiencia del sistema**

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{fung}}{\dot{Q}_{quemador}} \quad (4.24)$$

Obtención de Datos: Los flujos de energía se obtienen de las ecuaciones (4.19) y (4.21).

- **Pérdidas de líquido fungicida por kg de fruta cítrica:**

$$[CC_{perd\ fung}/Ton_{citrico}] = \frac{\dot{V}_{pérd\ fung}}{\dot{m}_{cítricos}} \quad (4.25)$$

Donde:

$\dot{m}_{cítricos}$ = Flujo másico de frutos cítricos en el proceso.

$\dot{Q}_{pérd\ fung}$ = Flujo volumétrico de mezcla fungicida atribuido a pérdidas.

Obtención de Datos: Esto se obtendrá de acuerdo a la información obtenida de la medición del tiempo del proceso antes del llenado (4.14) y el flujo productivo de cítricos para cada jornada de evaluación.

- **Consumo másico de GLP por kg de fruta cítrica**

$$[kg_{GLP}/Ton_{citrico}] = \frac{\dot{m}_{GLP}}{\dot{m}_{cítricos}} \quad (4.26)$$

Donde:

\dot{m}_{GLP} = flujo másico de combustible.

$\dot{m}_{cítricos}$ = flujo de cítricos en una jornada completa.

Obtención de Datos: El tiempo promedio se obtendrá de acuerdo a la experimentación 4.1.1, el flujo másico de combustible será determinado y la masa de cítricos se calcula de acuerdo a los datos entregados por la empresa Maf Chile.

- **Costo operacional de GLP (en Pesos chilenos) por Ton de fruta cítrica**

$$[CLP\$/kg_{citrico}] = \frac{\dot{m}_{GLP} \cdot t_{efectivo}}{\dot{m}_{cítricos} \cdot t_{jornada}} \cdot \frac{1}{\rho_{GLP}} \quad (4.27)$$

Donde:

$CLP\$/L_{GLP}$ = Precio en pesos chilenos por litro de GLP.

ρ_{GLP} = Densidad de GLP.

$t_{efectivo}$ = Tiempo efectivo de funcionamiento del quemador por jornada

$t_{jornada}$ = Tiempo de duración de una jornada de producción.

Obtención de Datos: La densidad y el precio del combustible se obtiene desde el Apéndice A. Por otro lado, el tiempo efectivo de funcionamiento del quemador, se determina de la experimentación y el tiempo de jornada es entrado por la empresa Santa Cruz.

Capítulo 5

Resultados y Análisis

5.1. Resultados a partir de la recolección de información

A continuación se presentan los datos extraídos durante las mediciones llevadas a cabo para el presente trabajo.

5.1.1. Temperatura del líquido fungicida en estanque principal

Se registra la temperatura, de acuerdo a las lecturas del tablero del equipo, cada 10 segundos durante un periodo de tiempo total de 20 minutos. Además, se registran los tiempos de calentamientos y enfriamiento de cada ciclo. El tiempo de calentamiento es el tiempo desde que ocurre el prendido del quemador (sin considerar prebarrido de aire) hasta el que se alcanza la temperatura de corte (40°), mientras que la temperatura de enfriamiento es el tiempo desde que se alcanza la temperatura máxima hasta que desciende a la temperatura de encendido del quemador (38°).

Primer Registro

Tabla 5.1: Condiciones iniciales de primera medición durante experimentación.

T° ambiental	23.1	[$^\circ\text{C}$]
Hora inicio	17:35	[hh:mm]
Flujo cítricos	92	[Bin/h]
Temperatura de cítricos	23.8	[$^\circ\text{C}$]

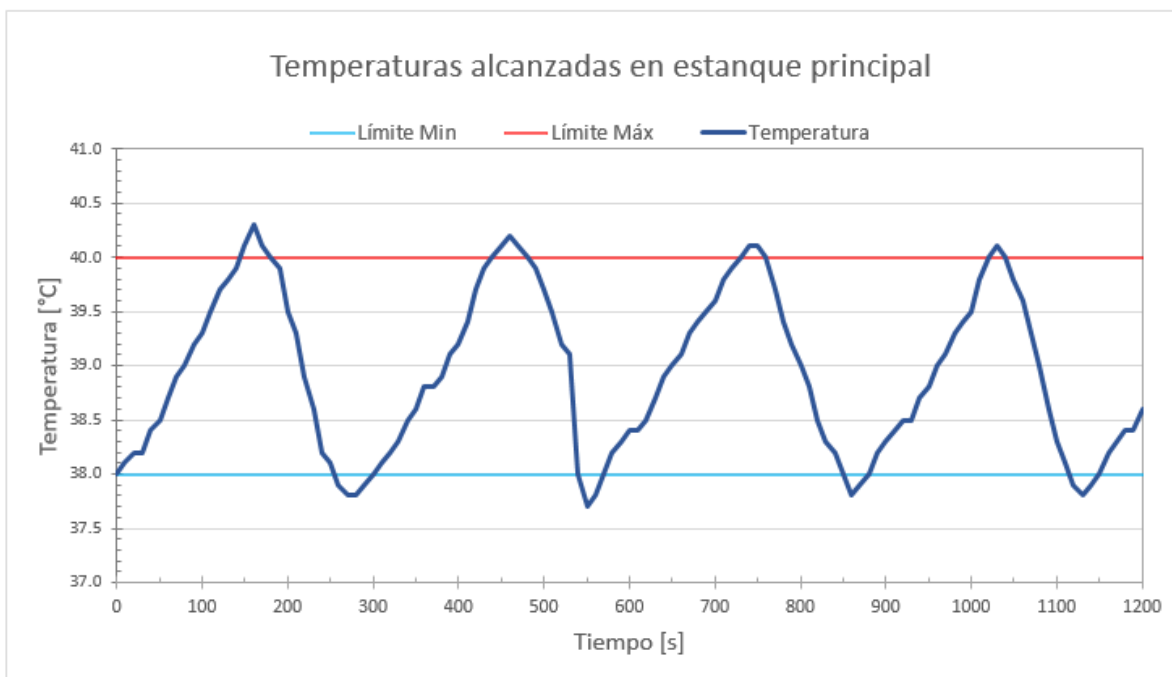


Figura 5.1: Temperatura de estanque principal, primer registro

Tabla 5.2: Tiempo de calentamiento y enfriamiento del estanque principal en cada ciclo. Primer registro

Medición	Tiempo calentamiento [s]	Tiempo enfriamiento [s]
1	146	96
2	159	93
3	155	96
4	156	96
Promedio	154	95

Segundo Registro

Tabla 5.3: Condiciones iniciales de segunda medición durante experimentación.

T° ambiental	23.6	[°C]
Hora inicio	17:22	[hh:mm]
Flujo cítricos	90	[Bin/h]
Temperatura de cítricos	24.6	[°C]

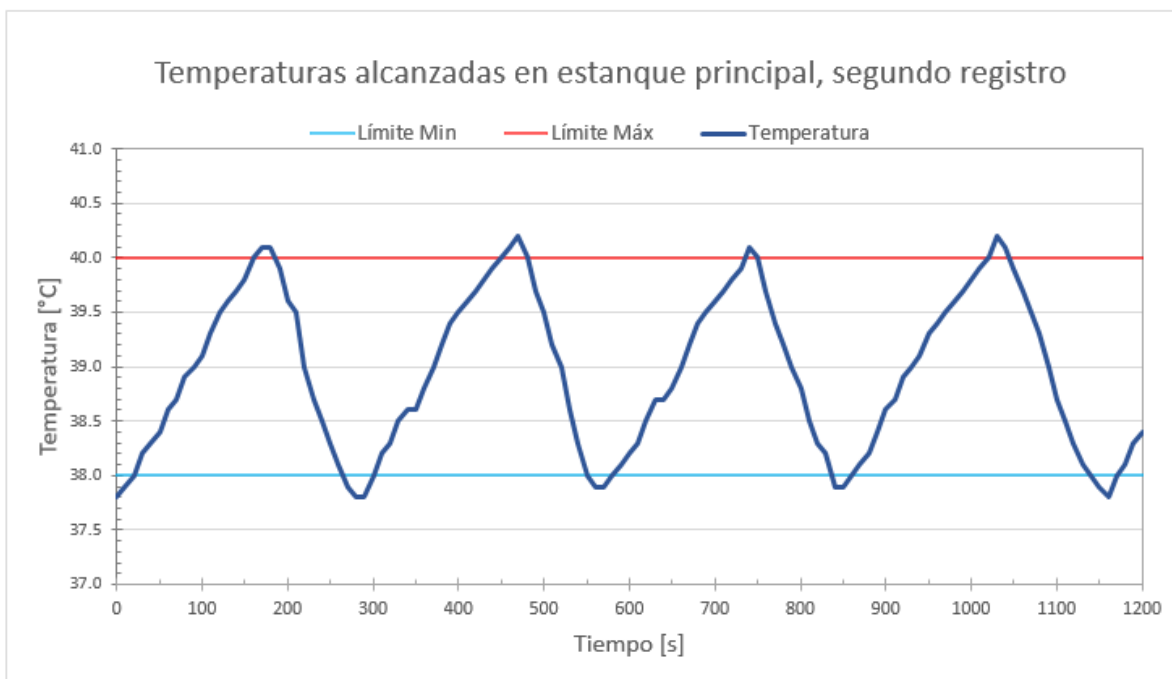


Figura 5.2: Temperatura de estanque principal, segundo registro

Tabla 5.4: Tiempo de calentamiento y enfriamiento del estanque principal en cada ciclo. Segundo registro

Medición	Tiempo calentamiento [s]	Tiempo enfriamiento [s]
1	162	90
2	160	87
3	161	88
4	162	97
Promedio	161	88

Tercer Registro

Tabla 5.5: Condiciones iniciales de tercera medición durante experimentación.

T° ambiental	24.4	[°C]
Hora inicio	17:40	[hh:mm]
Flujo cítricos	93	[Ton/h]
Temperatura de cítricos	24	[°C]

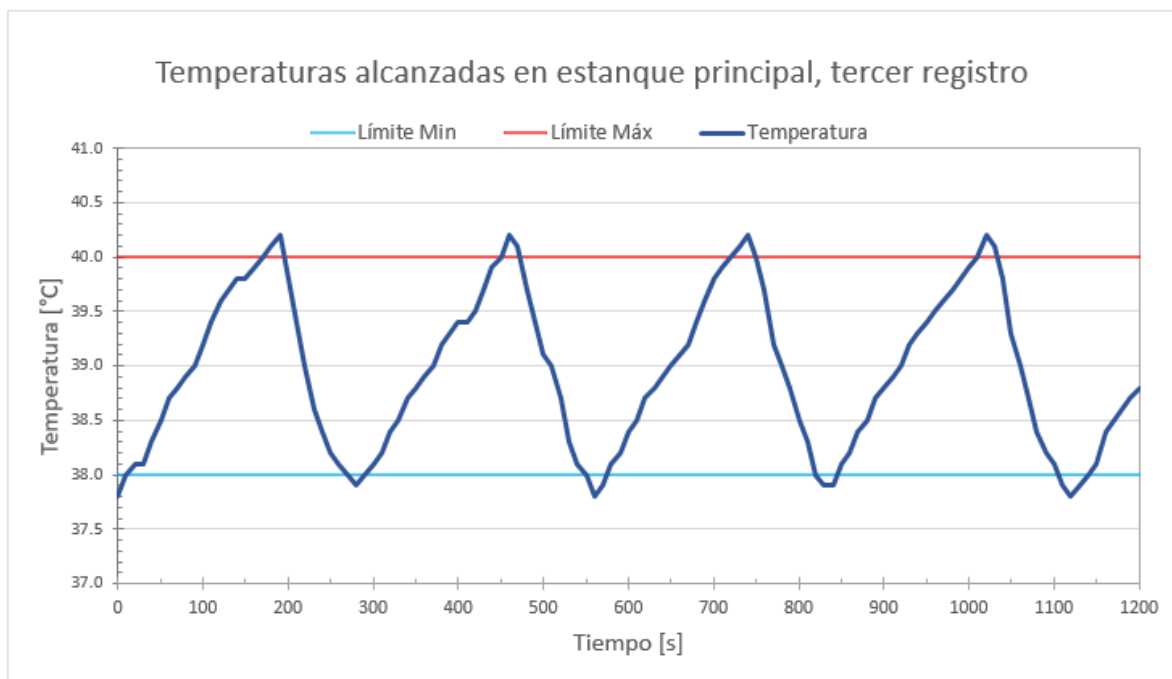


Figura 5.3: Temperatura de estanque principal, tercer registro

Tabla 5.6: Tiempo de calentamiento y enfriamiento del estanque principal en cada ciclo. Segundo registro

Medición	Tiempo calentamiento [s]	Tiempo enfriamiento [s]
1	166	80
2	162	82
3	163	80
4	163	82
Promedio	164	81

5.1.2. Medición de gases de escape

Durante una jornada de trabajo se registran 3 periodos consecutivos de encendido del quemador a las variables referidas a los gases de escape con el uso de un analizador de gases. Para este caso el flujo de cítricos en la línea de producción son 93 [Bin/hora].

Primer registro

Tabla 5.7: Resultados Analizador de Gases , primer registro

Variable	Unidad	Valor
Temperatura Gases	$^{\circ}C$	437,6
Temperatura ambiente	$^{\circ}C$	23,5
Oxigeno	% vol en base seca	3,7 %
CO	ppm	19
CO2	% vol en base seca	11,4 %
CO corregido	ppm	24

Segundo Registro

Tabla 5.8: Resultados Analizador de Gases, segundo registro.

Variable	Unidad	Valor
Temperatura Gases	$^{\circ}C$	438,2
Temperatura ambiente	$^{\circ}C$	24,2
Oxigeno	% vol en base seca	3,6 %
CO	ppm	18
CO2	% vol en base seca	11,4 %
CO corregido	ppm	24

Tercer Registro

Tabla 5.9: Resultados Analizador de Gases, tercer registro.

Variable	Unidad	Valor
Temperatura Gases	$^{\circ}C$	433,4
Temperatura ambiente	$^{\circ}C$	24,2
Oxigeno	% vol en base seca	3,6 %
CO	ppm	19
CO2	% vol en base seca	11,3 %
CO corregido	ppm	22

De acuerdo a los tres registros obtenidos, se presentan el promedio de los datos.

Promedio

Tabla 5.10: Resultados Promedio de los registros del Analizador de Gases.

Variable	Unidad	Valor
Temperatura Gases	$^{\circ}C$	436,4
Temperatura ambiente	$^{\circ}C$	23,97
Oxigeno	% vol en base seca	3,62 %
CO	ppm	18.67
CO2	% vol en base seca	11,36 %
CO corregido	ppm	23.33

De los resultados obtenidos, podemos ver información relevante como el % volumétrico oxígeno y dióxido de carbono, la temperatura de salida de los gases y el monóxido de carbono no diluido en los productos de combustión. De este último valor podemos apreciar en primera instancia que el valor de 23,33 ppm es relativamente bajo.

5.1.3. Tiempo de proceso antes del llenado de reposición

Promedio

Tabla 5.11: Tiempo de proceso antes del llenado de reposición de mezcla fungicida del estanque principal para tres jornadas distintas.

Jornada	Flujo Fruto [Ton/hora]	Tiempo de vaciado [Horas]
1	92	15,2
2	90	17.6
3	93	14,5

Se puede apreciar, la relación directa entre el flujo de cítricos en la línea de producción y el tiempo de vaciado entre los permitidos en el estanque principal.

5.1.4. Capacidad Calorífica de la mezcla

De acuerdo a la experimentación se obtiene un valor de:

$$Cp_{mezcla} = 4,51 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right] \quad (5.1)$$

5.2. Análisis

5.2.1. Interpretación de resultados de combustión y calentamiento del fluido

Variables de combustión

En primer lugar, de los datos promedio obtenidos de la combustión, según la tabla 5.7 relevantes a los gases de escape podemos afirmar lo siguiente:

- La temperatura de gases de escape (436°C), es una temperatura relacionada a calderas atmosféricas, es decir toman el aire de las condiciones de entorno del quemador.
- La concentración de CO_2 está dentro de los valores típicos de calderas de gas (12 % aprox)[14]
- La concentración de CO y CO corregido (monóxido de carbono no diluido) cumplen la norma de emisión de fuentes estacionarias del Ministerio de Salud de Chile (<100 ppm). [13]

De acuerdo a lo mencionado, pese a que el quemador no se encuentra en su carga máxima (funciona sólo en su primera etapa), las variables de combustión están dentro de los estándares requeridos de salud y medioambientales. Además, de los valores de CO, podemos afirmar que su aporte es muy bajo (25 ppm son equivalentes a un 0,0025 %), por lo que la combustión prácticamente es completa. De igual manera, el aporte calorífico de CO es igual considerado para el cálculo del flujo de calor desprendido por los gases de escape.

Calentamiento del fluido

Según los resultados de los datos relevantes a la temperatura del estanque principal (sección 5.1.1), podemos apreciar claramente un carácter oscilatorio tanto en el incremento como decaimiento de temperatura. Pese a que el encendido y apagado del equipo se produce en puntos de temperatura específico, la inercia del sistema lleva una prolongación de incremento y decaimiento por sobre las temperaturas límites. Pese a eso, el sistema, responde de manera óptima a estas desviaciones no incidiendo de sobremedida en la temperatura requerida para el proceso, ni tampoco produce una sobreexigencia del quemador.

De acuerdo a lo anterior, existe una relación entre el flujo de cítricos en la línea y el tiempo para cada etapa térmica del estanque. Esto es ratificado al graficar los datos promedios de tiempo calentamiento y enfriamiento en función del flujo de cítrico.

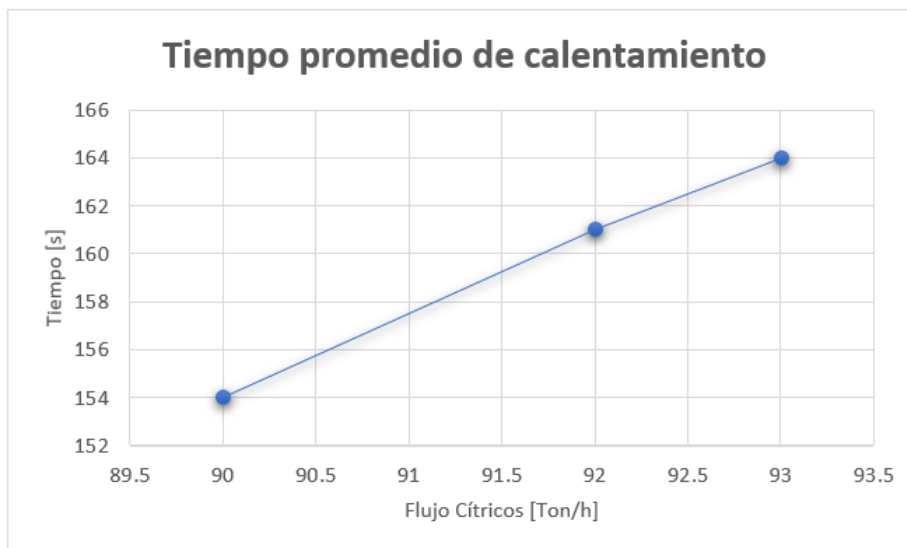


Figura 5.4: Tiempo promedio de calentamiento en función de flujo de cítricos, para estanque principal

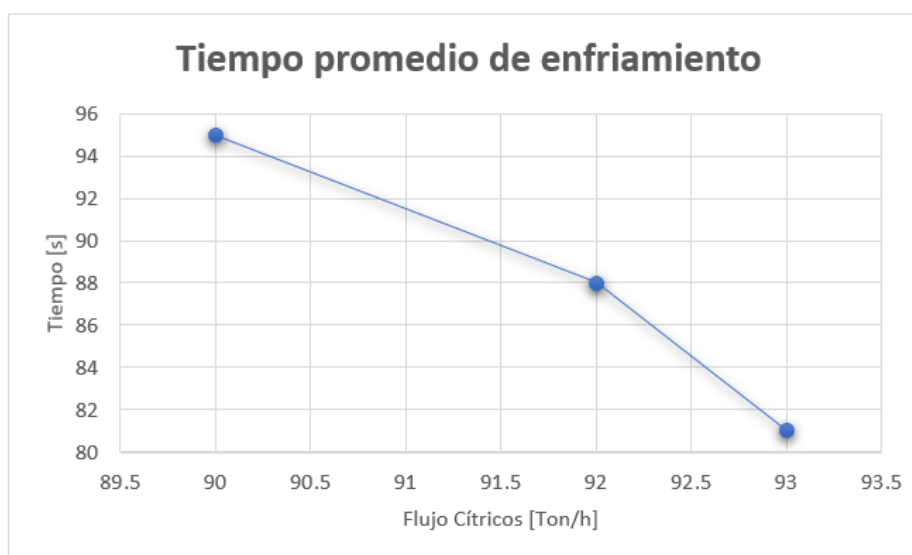


Figura 5.5: Tiempo promedio de enfriamiento en función de flujo de cítricos, para estanque principal.

En ambos gráficos, se determina las temperaturas promedios de calentamiento y enfriamiento del estanque según los ciclos para cada jornada de medición. La influencia del valor del flujo de cítricos se ve reflejada en los tiempos en que se alcanzan las temperaturas máximas y mínimas. Es decir, un aumento en el flujo por línea de producción, incrementa el tiempo de funcionamiento de quemador y disminuye el tiempo de reposo del mismo. Esto es muy importante para determinar el tiempo efectivo de funcionamiento del quemador.

Por otro lado, de los datos de tiempo de vaciado, podemos distinguir como afecta este mismo flujo de cítricos en la reposición de la mezcla fungicida. De la misma forma se grafica este mismo fenómeno.

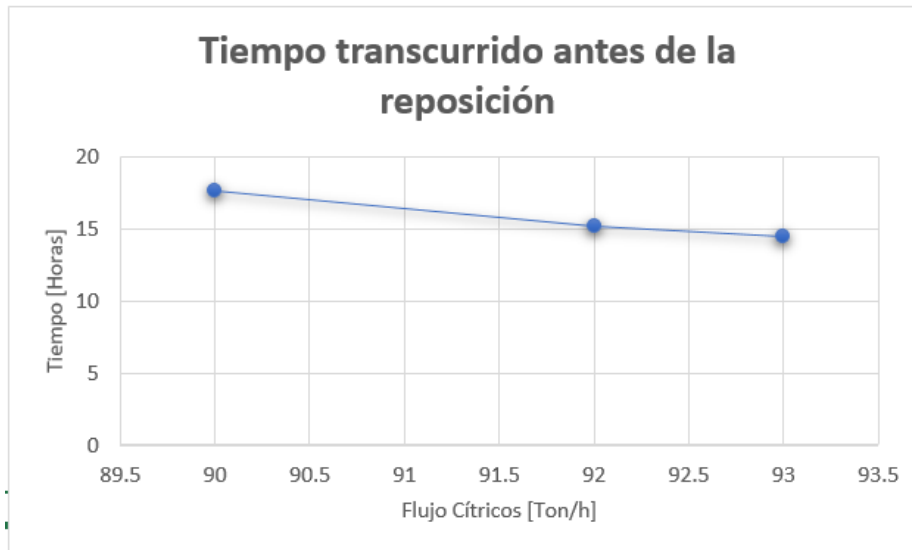


Figura 5.6: Tiempo transcurrido antes del inicio de reposición de mezcla fungicida en estanque principal.

De la figura 5.6 podemos ver que un aumento en el flujo de cítricos induce en un anticipado inicio de reposición de la mezcla, es decir, un mayor flujo de cítricos en la línea produce un gasto mayor de fungicida.

Considerando ambos procesos de medición, se afirma que un mayor flujo de cítricos produce una prolongación en el tiempo de funcionamiento del quemador durante una jornada y un mayor consumo de mezcla fungicida.

En ambos casos, el equipo está configurado para que las temperaturas oscilen entre 38°C y 40°C , es decir una variación de T° de 2°C aproximadamente. Sin embargo, no todos los frutos se pueden mantener en ese rango y pueden necesitar una variación de tiempo menor por requerimientos de calidad. Es por esto que, que se decide cuantificar la influencia tanto del flujo de cítricos como la variación de temperatura.

5.2.2. Determinación de Potencia del quemador

Según la ecuación 4.22 del capítulo 4, se podrá obtener el flujo másico de combustible y posteriormente la potencia de trabajo del quemador. Para la determinación de estas variables y análisis de indicadores, se consideran los datos de acuerdo a la tercera jornada de medición, que es la jornada donde se realiza la medición de gases de escape. A continuación se muestra el cálculo de las variables involucradas.

En primer lugar para el calor de calentamiento de fungicida (\dot{Q}_{fung}), se determina de acuerdo a la ecuación (4.14). Para determinar este flujo calor, se deben conocer previamente, el valor de la densidad de la mezcla, el poder calorífico de la misma y el tiempo de calentamiento.

Para el trabajo del equipo, se utilizan 1300[L] efectivos de líquido en el estanque a una concentración 0,27 [ml/l] de fungicida, es decir, 350 [ml] en el volumen total. Por lo tanto, la densidad del

la mezcla de acuerdo a la ecuación (4.12) es:

$$\rho_{mezcla} \sim 1 \left[\frac{kg}{L} \right] \quad (5.2)$$

El tiempo de calentamiento, se obtiene del tercer registro de temperatura promedio de calentamiento del estanque (Figura 5.4), es decir 164 [seg]. Del mismo modo el calor específico tiene un valor de 4.51 [kJ/(kg · K)] (Ecuación 5.1).

Con estos datos, según la ecuación 4.14, el valor del flujo de calor necesario para el proceso es:

$$\dot{Q}_{fung} = 71,507 \left[\frac{kJ}{s} \right] \quad (5.3)$$

Por otra parte, se debe determinar el poder calorífico del combustible para una composición de 97% Propano y 3% butano (El desarrollo de este cálculo de puede ver en el apéndice A.4). Para este caso el PCI del GLP es:

$$PCI_{GLP} = 49.822,38 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (5.4)$$

Luego, se determina el calor de los gases de escape. Para esto se requiere antes el cálculo del exceso de aire. Según la ecuación 4.17, el exceso de aire y la variable λ se obtienen con los datos promedio del porcentaje volumétrico de oxígeno desde la Tabla 5.7, resultando:

$$\begin{aligned} Exceso_{aire} &= 18,17\% \\ \lambda &= 1,18 \end{aligned} \quad (5.5)$$

De este último valor podemos afirmar que $\lambda > 1$ por lo que la mezcla es pobre y estimula que la combustión sea completa. Esto explica el por qué la presencia de CO es tan baja.

Después, se determinan los valores de composición molar por kg de combustible para los gases de escape. Para esto se necesita los porcentajes volumétricos de CO_2 y CO. El primero se desprende de la Tabla 5.7, mientras que el CO se obtiene según las ecuaciones del Apéndice F.2, resultando:

$$\begin{aligned} y_{CO_2} &= 11,36\% \\ y_{CO} &= 0,06\% \end{aligned} \quad (5.6)$$

Por lo tanto según la ecuación (4.19), los valores de composición son:

$$\begin{aligned} N_{CO_2} &= 0,0670 \left[\frac{kmol}{kg\ comb} \right] \\ N_{O_2} &= 0,0213 \left[\frac{kmol}{kg\ comb} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{H_2O} &= 0,0905 \left[\frac{kmol}{kg \text{ comb}} \right] \\
N_{N_2} &= 0,5064 \left[\frac{kmol}{kg \text{ comb}} \right] \\
N_{CO} &= 0,0010 \left[\frac{kmol}{kg \text{ comb}} \right]
\end{aligned} \tag{5.7}$$

Además, el calor específico de los gases de escape son determinados con la función del Apéndice F.1 y la temperatura promedio de los gases de salida (436°C) de la tabla 5.8.

$$\begin{aligned}
C_{pCO_2} &= 49,740 \left[\frac{kJ}{kmol \cdot K} \right] \\
C_{pO_2} &= 33,132 \left[\frac{kJ}{kmol \cdot K} \right] \\
C_{pH_2O} &= 37,632 \left[\frac{kJ}{kmol \cdot K} \right] \\
C_{pN_2} &= 30,827 \left[\frac{kJ}{kmol \cdot K} \right] \\
C_{pCO} &= 31,259 \left[\frac{kJ}{kmol \cdot K} \right]
\end{aligned} \tag{5.8}$$

Con esto, el flujo de calor perdido por los gases de escape en función de flujo de combustible, según la ecuación 4.20 resulta:

$$\dot{Q}_{GE} = \dot{m}_{GLP} \cdot 9.493 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \tag{5.9}$$

Finalmente, considerando un 5% pérdidas del calor debido a radiación y otros, el flujo másico de combustible(según la ecuación 4.22) resulta:

$$\dot{m}_{GLP} = \frac{\dot{Q}_{fung}}{0,95PCI_{GLP} - 9493} = 0,0019 \left[\frac{kg}{s} \right] = 6,84 \left[\frac{kg}{H} \right]$$

Y la potencia de trabajo del quemador es:

$$\dot{Q}_{quemador} = \dot{m}_{GLP} \cdot PCI_{GLP} = 94,66[kW] \sim 95[kW] \tag{5.10}$$

Finalmente, con el coeficiente de aire ya obtenido, se puede determinar el flujo másico de aire utilizado. Para esto, se utilizan las ecuaciones 4.7 y 4.8 para obtener el valor de la relación aire combustible:

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{GLP}} = 18,44 [-] \tag{5.11}$$

Posteriormente, según la ecuación 4.9 el flujo másico de aire utilizado es:

$$\dot{m}_{aire} = AC \cdot \dot{m}_{GLP} = 0,035 \left[\frac{kg}{s} \right] = 1.260 \left[\frac{kg}{H} \right] \tag{5.12}$$

Como se mencionó en el capítulo 3, el quemador en primera instancia se encuentra sobredimensionado ya que trabaja sólo en su primera etapa. Pero de acuerdo a los cálculos vistos hasta este punto, no sólo el equipo funciona en su primera etapa, sino que está regulado para trabajar a una potencia mucho menor de la esperada. Esto claramente prueba una decisión apresurada al escoger el quemador a utilizar.

Por otro lado es cierto que la combustión, según el análisis de gases, entrega valores muy positivos de acuerdo a las reglamentaciones del país gracias a un exceso de aire beneficioso. Esto no da una oportunidad de poder modificar el funcionamiento del quemador pensando en optimizar el proceso. Según el documento "*Análisis teórico de la combustión de quemadores de gas natural*" [16], el exceso de aire y la temperatura de los productos en un proceso térmico basado en la combustión son las variables más importantes en el aspecto energético. Pese a que no utiliza el mismo combustible (gas natural), poseen poder caloríficos similares y ese estudio nos permite proyectar posibles modos de acción para mejorar el sistema.

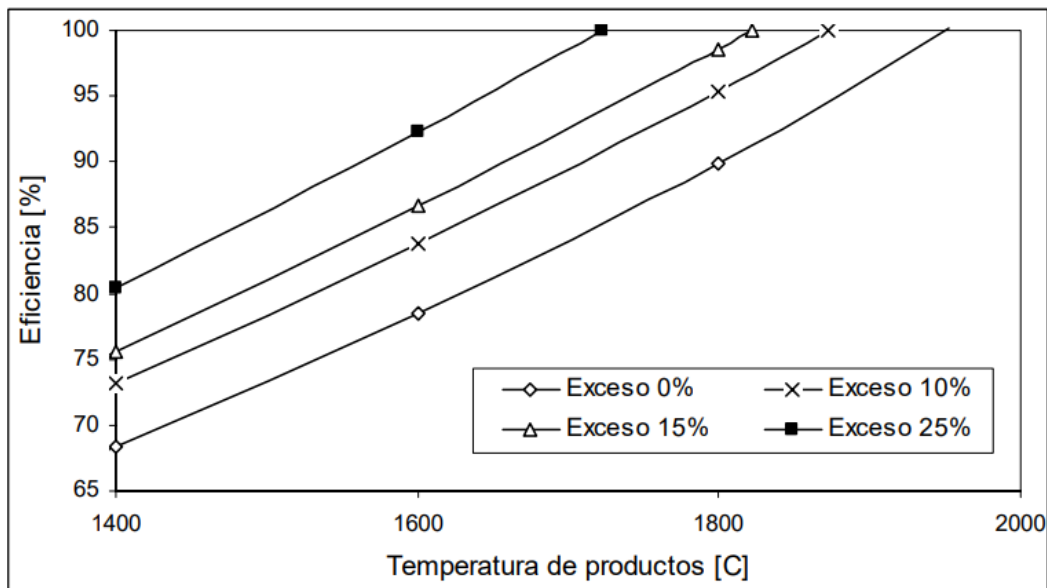


Figura 5.7: Eficiencia de combustión vs temperatura de productos y exceso de aire

Fuente: //dialnet.unirioja.es/

El aumento del exceso de aire, como muestra la figura 5.7, genera un aumento de la eficiencia de la combustión debido a una baja en producción de CO. (causa una reacción endotérmica) pero, este aumento de aire produce una baja considerable en el calor disponible que se entrega desde el combustible (Figura 5.8). Por lo tanto, una manera de optimizar el sistema sería bajar un % en el exceso de aire, controlando los niveles de producción de CO.

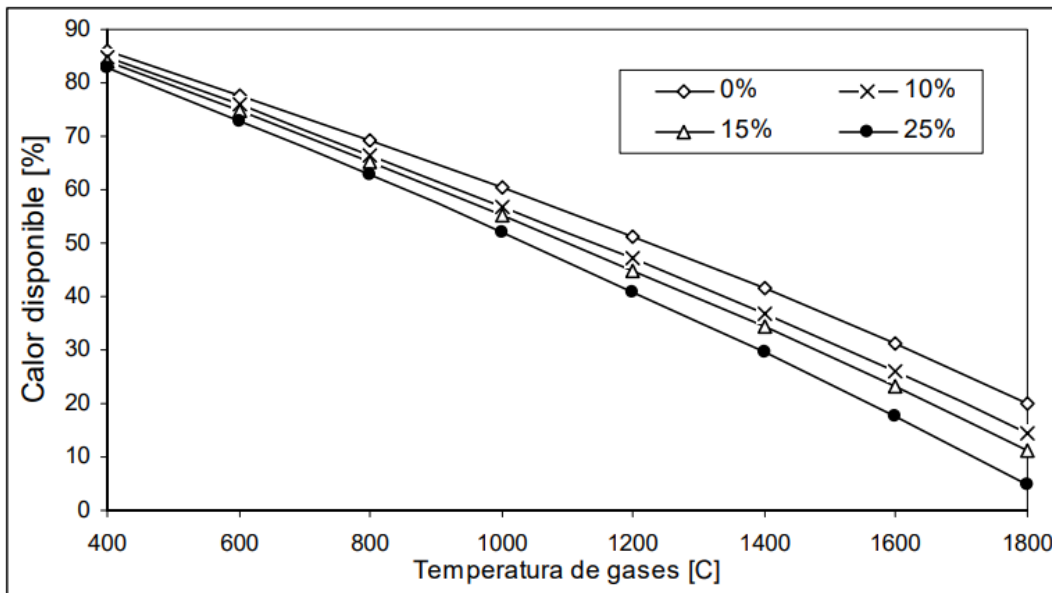


Figura 5.8: Porcentaje de calor disponible respecto al poder calorífico superior como función de la temperatura de los gases de combustión y el exceso de aire.

Fuente: //dialnet.unirioja.es/

La temperatura de los gases de combustión también nos permite un acceso a mejorar la eficiencia del proceso. Tal como muestra la figura 5.8, un aumento en la temperatura de los gases baja dramáticamente el calor disponible. Es aquí donde un recuperador de calor se torna como una alternativa viable no utilizada previamente. Es decir, un dispositivo intercambiador de calor que permita aprovechar las altas temperaturas de los productos para entregar esa energía al líquido del estanque principal.

En consecuencia, si se desea buscar una optimización al sistema, se tendría que realizar un segundo estudio enfocado en las variables vistas para mejorar la eficiencia del sistema. Por un lado regulando la cantidad y la temperatura de aire utilizado y por otro usando un sistema de recuperación de calor que pueda aprovechar temperatura de los gases a la salida y pueda entregarlos directamente a la mezcla líquido fungicida

5.2.3. Indicadores

Del mismo modo que para el cálculo de la potencia del quemador, sólo se utilizan los datos de la tercera jornada, ya que fue en la que se midieron los gases de salida y por ende, determinar la masa y potencia del quemador.

- **Eficiencia del sistema**

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{fung}}{\dot{Q}_{quemador}} \cdot 100\% = \frac{71,348}{93,964} \cdot 100\% \sim 76\% \quad (5.13)$$

Este valor muestra una eficiencia aceptable dentro del rango estimado para un sistema caldera-quemador de gas. Si desglosamos el comportamiento térmico resulta lo siguiente:

Tabla 5.12: Balance de energía equipo.

Ítem	Valor	
	kW	%
Pérdida por gases de combustión	90	17
Pérdidas radiación y otros	94	5 %
Calor útil producto del equipo	94	16,3
Calor aportado por el combustible	94	100 %

Con estos datos podemos afirmar, que el quemador elegido para este proceso en las condiciones de temperatura y tiempos de calentamiento (que se consideran correctos de acuerdo a la empresa Santa Cruz), esta sobredimensionado para el proceso, ya que la potencia utilizada es menor a la potencia máxima posible del quemador en su primera etapa (125[kW]) y muy lejos del valor de potencia máxima total del equipo (390[kW]). Sin embargo, pese a que el valor determinado es menor, podría incrementarse en otros posibles escenarios que se verán más adelante.

Por otro lado, de acuerdo a lo descrito en el capítulo 4, el valor estimado de pérdidas es una cifra conservadora, según otros equipos de similares potencias y combustible por lo que, el valor de la potencia de trabajo podría ser menor.

■ Pérdidas de líquido fungicida por kg de fruta cítrica

Para esto se requiere el cálculo del caudal perdido en la tercera jornada de medición, según el tiempo del proceso antes de la reposición y el volumen que permite vaciar el estanque mencionado en el capítulo 3. Obteniéndose lo siguiente:

$$\dot{V}_{perd\ fung} = \frac{125000[cc]}{14,5[h]} = 8.620,68 [cc/H] \quad (5.14)$$

Ahora recordando la tabla 4.2 el flujo de cítricos para la tercera jornada es:

$$\dot{m}_{citrnico} = 93 [Ton/H]$$

Por lo tanto las pérdidas de líquido fungicida por kg de fruta son:

$$[cc_{perd\ fung}/kg_{citrnico}] = \frac{\dot{V}_{perd\ fung}}{\dot{m}_{citrnico}} = \frac{8620,68 [cc/H]}{93 [Ton/H]} = 92,70 [cc/Ton\ fruta] \quad (5.15)$$

Este índice nos muestra un orden magnitud para saber la pérdida de fungicida aproximada. Para tener más precisión en el valor se debería haber optado un mayor número de mediciones. Sin embargo este orden de magnitud nos sirve para relacionar los costos asociados al fungicida.

- **Consumo másico de GLP por kg de fruta cítrica**

De acuerdo a los datos previos:

$$[kg_{GLP}/Ton_{citríco}] = \frac{\dot{m}_{GLP}}{\dot{m}_{citrícos}} = \frac{0,678 [kg/H]}{93[Ton/H]} = 0,0072 \left[\frac{kg_{GLP}}{Ton_{citríco}} \right] \quad (5.16)$$

- **Costo operacional de GLP (en Pesos chilenos) por Ton de fruta cítrica**

Para determinar este indicador, se requiere el tiempo efectivo de funcionamiento del quemador durante la jornada completa. De acuerdo a los resultados de la Tabla 5.6 se obtiene un tiempo de funcionamiento de 164 [s] por ciclo, en los 1140 [s] de medición. (Se descartan los últimos 60 segundos ya que corresponden a un nuevo ciclo).

De acuerdo a la información de Santa Cruz, la empresa opera en jornadas de 21 [H], por lo que el tiempo efectivo de operación del quemador corresponde a:

$$t_{jornada} = 21[H] \cdot \frac{60 [min]}{1 [H]} \cdot \frac{60 [s]}{1 [min]} = 75.600 [s]$$

$$t_{efectivo} = 164[s] \cdot 4 \cdot \frac{75.600 [s]}{1140 [s]} = 43503 [s] = 12,08 [H] \quad (5.17)$$

Por lo tanto, con el costo del combustible GLP con la información del Apéndice A.3:

$$[CLP\$_{GLP}/Ton_{citríco}] = \frac{t_{efectivo} \cdot \dot{m}_{GLP}}{\dot{m}_{citrícos} \cdot t_{jornada}} \cdot \frac{\$_{GLP}}{\rho_{GLP}} = \$55,079 [CLP/Ton_{fruta}] \quad (5.18)$$

De acuerdo a este último índice se describe el costo monetario en consumo de gas por cada tonelada de cítrico procesada. Por lo tanto el costo mensual para mantener el quemador en funcionamiento es:

$$Costo_{mensual} = 55,079 [CLP/Ton_{fruta}] \cdot 90 [ton/H] \cdot 21 [H] \cdot 30[días] \sim \$3.123.000 [CLP] \quad (5.19)$$

Es necesario decir, que se puede considerar adicionalmente como costos de proceso, el consumo de fungicida utilizado. Para esto se puede realizar el mismo procedimiento realizado, calculando el costo de consumo del llenado del estanque más los costos de pérdidas de líquido fungicida. Sin embargo no se incluye estos costos debido a que no es el enfoque del trabajo. De igual manera, el índice de líquido de fungicida por kg de fruta cítrica permite llegar a esa solución para cualquier tipo de fungicida que se utilice, ya sea cítricos u otras frutas.

5.2.4. Potencia de quemador para otros posibles escenarios

Para este punto, se desarrolla dos posibles escenarios factibles en el proceso y se determina la potencia y costos de consumo de combustible mensual.

Como se explicó en el capítulo 3, los flujos de frutas en la línea a de producción son variados, dependiendo del fruto, la época del año, factores climatológicos, etc. Pero de acuerdo a las proyecciones de los últimos años, la producción debiese aumentar, especialmente el mercado de cítricos. Es por esto, que un escenario a considerar es el aumento flujos en línea de producción. Considerando que el sistema tiene una capacidad teórica de 100 [Ton/H] máxima, se expondrá un caso con un 50% de aumento en el flujo para futuros proyectos, es decir, un flujo de 150 [Ton/H].

Por otro lado, el tiempo de calentamiento, es una variable de interés pensando disminuir el consumo de combustible.

De acuerdo a lo anterior se expondrá dos escenarios relacionando estas variables.

Escenario 1: Producción de 150 [Ton/H]

Según lo que se ha planteado, el aumento del flujo en la línea influye en el consumo de combustible, mas no en la potencia del quemador. Por lo tanto, de los datos de la tabla 5.6, se puede obtener una relación matemática entre el flujo de cítricos y el tiempo de calentamiento y enfriamiento. Utilizando una línea de tendencia potencial para los datos de calentamiento se tiene lo siguiente:

$$t_c(x) = 0,0256x^{1,9339}$$

$$R^2 = 0,9984 \quad (5.20)$$

$t_c(x)$ = tiempo de calentamiento [s]

x = Flujo de cítricos [Ton/H]

Nótese que el valor de R^2 (coeficiente de determinación), que es un buen ajuste de la línea de tendencia de los datos.

Del mismo modo, el tiempo de enfriamiento, tomando ajuste lineal, se tiene lo siguiente:

$$t_e(x) = ,4,5x + 500,5$$

$$R^2 = 0,9643 \quad (5.21)$$

$t_e(x)$ = tiempo de enfriamiento [s]

x = Flujo de cítricos [Ton/H]

Por lo tanto para un flujo de cítricos de 150 [Ton/H] los tiempos son:

Tabla 5.13: Tiempo de calentamientos y enfriamiento del estanque para 150 [Ton/H] de cítricos.

Ítem	t[s]
Tiempo calentamiento	411
Tiempo enfriamiento	10

Por lo tanto, utilizando el indicador de costo mensual ya visto y la metodología de la sección 5.2.3 se tiene lo siguiente:

$$t_{efectivo\ 1} = 414[s] \frac{75600}{421[s]} = 74,342[s] \sim 21 [H]$$

$$[CLP\$/GLP/Ton_{citríco}]_1 \sim 62 [CLP/Ton\ fruta]$$

$$Costo_{mensual\ 1} \sim 62,3 [CLP/Ton\ fruta] \cdot 150 [ton/H] \cdot 21 [H] \cdot 30[días] \sim \$6.000.000 [CLP]$$

De acuerdo a estos datos, utilizando el mismo quemador, a la misma potencia utilizada, se incrementan los costos por consumo de gas GLP en un 50 % aproximadamente.

Escenario 2: Disminución a la mitad del tiempo de calentamiento

Este escenario, nos muestra como influye en la potencia de trabajo del quemador, si se desea que el tiempo de calentamiento disminuyera a la mitad, para el mismo flujo de cítricos.

Por lo tanto, según la ecuación el calor necesario nuevo es:

$$\dot{Q}_{fung\ 2} \sim 143 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (5.22)$$

Asumiendo los mismos valores asociados a los gases de escape de la sección 5.5.2, el flujo másico de combustible resulta:

$$\dot{m}_{GLP\ 2} = 0,0038 \left[\frac{kg}{s} \right] \sim 14 \left[\frac{kg}{H} \right] \quad (5.23)$$

y la potencia de trabajo del quemador sería:

$$\dot{Q}_{quemador\ 2} \sim 190 \left[\frac{kJ}{s} \right] \quad (5.24)$$

Se puede apreciar, que aún con una disminución importante del tiempo de calentamiento, el quemador utilizado sigue teniendo mucho margen de potencia. Para este escenario visto, la potencia aumenta un 100 % aproximadamente, en comparación con el estado actual de funcionamiento.

En este escenario, no es posible analizar el consumo de combustible, ya que al modificar el tiempo de calentamiento, se modifica el tiempo de enfriamiento, que sólo se podría conocer si se evalúa experimentalmente el equipo a distintos puntos de flujo másico de combustible. Además, se debería relacionar el flujo másico de combustible con el calor que se libera en los gases de escape (composición y temperatura) y la eficiencia del intercambiador de calor.

Finalmente con esta información, se demostró mediante ejemplos o escenarios concretos que el equipo está sobredimensionado para el proceso de aplicación de fungicida en cítricos.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

Finalmente de acuerdo a lo expuesto en este trabajo, se logró cumplir con los objetivos planteados desde un inicio, obteniéndose las siguientes conclusiones:

Conclusiones

- Se implementó un sistema de medición, tanto para el registro de variables en los gases de escape como registro de variables relacionadas en el estanque de mezcla líquida fungicida. La principal dificultad, estuvo en que el equipo trabaja practicamente de forma continua y no se tenía instrumentos adecuados para medir, por lo que hubo que fabricar instrumentos y adaptar el sistema de medición a las condiciones disponibles.
- Se evaluó el calor requerido para el proceso estimando un valor de 72 [kJ/kg] y posteriormente se determinó el valor del flujo másico de combustible y la potencia del quemador, que tiene un valor de 95 [kW] aproximadamente.
- De los resultados, se observa la directa relación entre el flujo cítricos en la línea de manipulación con el tiempo de funcionamiento del quemador, y el gasto de líquido fungicida.
- De los análisis posteriores se rescata que la combustión posee niveles mínimos de CO, beneficiando una combustión completa y que el quemador se encuentra sobredimensionado para el proceso que está siendo utilizado.
- El sistema queda con una eficiencia de 76 % en su comportamiento actual. Esto demuestra que el equipo pese a estar sobredimensionado para el proceso, funciona en condiciones de quemado positivos. Además, se determinan índices relacionando el consumo de combustible y líquido fungicida en función del flujo másico de cítricos en la línea de manipulación.
- Para optimizar el sistema se establece que un reducción de aire de combustión (actualmente con un exceso de 18 %) podría beneficiar en un un aumento en el flujo de calor aportado al proceso, siempre cuando se mantengan los límites de concentraciones estables. Además, al sistema tiene todas las condiciones para instalar un recuperador de calor para aprovechar el flujo de calor que se expulsa por los gases de escape.
- En un escenario donde el flujo de cítricos en la línea aumenta a 150 [Ton/H], los costos mensuales de consumo de GLP, crecen un 70 %, debido a una prolongación del tiempo efectivo de trabajo del quemador en un 150 %, si la potencia de trabajo se mantuviera en el punto de trabajo actual.

-
- En otro escenario, en donde el tiempo de calentamiento se reduce a la mitad, el equipo necesitaría una potencia de trabajo de 190 [kW], demostrando que a una sobreexigencia del equipo sigue estando sobredimensionado para el proceso.

Además, para nuevos proyectos similares, se entregan las siguientes recomendaciones:

Recomendaciones

- Un medidor de caudal en el quemador o la salida de los gases de escape, entregarían datos más confiables y permitiría la creación de una base de datos para el cálculo de la potencia de trabajo para distintos puntos de operación.
- La creación de un software que permita almacenar las temperatura en tiempo real del estanque principal permitiría, junto con los valores de gases de escape, el poder encontrar el punto operación de funcionamiento del quemador sólo con conocer el flujo de cítricos en la línea e información relevante al líquido fungicida.
- Para poder analizar costos asociados de GLP y líquido fungicida para cualquier punto de potencia, se necesitaría realizar esta misma metodología a distintos puntos de flujo másico de combustible, y posteriormente, mediante el uso de las recomendaciones anteriores.
- Si quiere llevar a un paso siguiente la optimización del sistema, habría que realizar una evaluación térmica al intercambiador de calor.
- Si se desea aumentar la potencia del proceso, a los escenarios planteados, es necesario realizar un estudio previo a las condiciones de llama (longitud y dirección) del quemador, para evitar daños en las paredes del intercambiador.

Referencias

- [1] FRUITS FROM CHILE. Consulta estadísticas exportaciones de cítricos chilenos. Desde <https://fruitsfromchile.com/fruit/citrus/>
- [2] Murray, R., Candan, A. P., & Vázquez, D. (2012). "Manual de poscosecha de frutas". *Manejo Integrado de Patógenos. Ediciones INTA, Buenos Aires (ISBN N 978-987-679-274-5)*. (Paginas 39-40-41).
- [3] NEW ZEALAND FOOD SAFETY. Pesticide maximum residue level legislation around the world, Consulta estadísticas LMR para plagicidas por países. Desde <https://www.mpi.govt.nz/growing-and-harvesting/plant-products/pesticide-maximum-residue-levels-mrls-for-plant-based-foods/pesticide-maximum-residue-level-legislation-around-the-world/>
- [4] Cengel, Y. A., Boles, M. A., Campos Olguín, V., & Colli Serrano, M. T. (2003). *Termodinámica*.
- [5] GLP CHILE, Consulta estadísticas acerca de GLP en Chile. Desde; <http://glpchile.cl/el-glp-en-chile/estadisticas>
- [6] Victoria, Á. H. R., Giraldo, J. E. T., & Sánchez, Y. A. C. (2004). *Análisi de la influencia de la relación de equivalencia y el precalentamiento del aire en la composición y propiedades de los productos de quemador de un quemador de ACPM. Scientia et technica, 1(24), 157-162.*
- [7] Ruz Espinoza, A. A. (2008). *Diseño, Construcción y Pruebas de un Quemador de Gas. Estudio de Diseño de Torre Precalcinadora para Planta Piloto de Producción de Clinker.*
- [8] WIKIPEDIA. Consulta composición aire. Desde [https://es.wikipedia.org/wiki/Aire#Composición_del_aire](https://es.wikipedia.org/wiki/Aire#Composici3n_del_aire)
- [9] INDURA. Consulta composición GLP. Desde http://www.sec.cl/pls/portal/docs/PAGE/SEC2005/COMBUSTIBLES/HDS/GLP/HDS_INDURA_GAS_LICUADO_DE_PETROLEO.PDF
- [10] Rosales, Carlos. (2014). Ecuaciones para Combustión Incompleta. *MEC-311:Equipos de Procesos Térmicos, Semestre I - 2014.*
- [11] ACADEMIA ONLINE. Consulta para determinar coeficiente de exceso de aire en analizador Testo . Desde <http://www.academiatesto.com.ar/cms/rendimiento-de-la-combustion>
- [12] Bahamondes, P. A. (2006). Potencia y Rendimiento de la Caldera. *Asociación Chilena de Seguridad (ACHS)*.(Página 5).

- [13] MINISTERIO DE SALUD. Secretaría Regional Ministerial Región Metropolitana. *'Establece fuentes estacionarias a las que son aplicables las normas de emisión de dióxido de carbono (CO) y dióxido de azufre (SO₂)'*.
- [14] TESTO. Consulta valores de de concentraciones para gases de escape. Desde <http://analizador-gases.es/test-3-2/>
- [15] INGEMECANICA. Consulta valores de PCI de compuestos de GLP. Desde ingemecanica.com/tutoriales/objetos/tablas/calorifico/calor49.jpg
- [16] Rico, J. C. S., & Sánchez, Y. A. C. (2005). Análisis teórico de la combustión en quemadores de gas natural. *Scientia et technica*, 3(29), 139-143.

Apéndice A

Combustible GLP

A.1. Norma Chilena GLP

GASES LICUADOS DE PETRÓLEO (GLP)		NCh 72 Of. 99				
Propiedad	PROPANO	BUTANO	MEZCLA	Unidad	Método Análisis	
	COMERCIAL	COMERCIAL	PROPANO		ASTM	
			BUTANO			
			COMERCIAL			
Densidad relativa 60/60 °F	mín. 0,500	-	mín. 0,500	-	D 1657	
Contenido de agua libre	-	No	No	-	D 1835	
Azufre	máx. 150	máx. 150	máx. 150	ppm	D 3246 o D 6667	
Corrosión lámina de Cobre	máx. 1	máx. 1	máx. 1	N°	D 1838	
Odorización	Si	Si	Si	-	NCh 2394	
Presión de Vapor a 37,8 °C (100 °F)	máx. 1430	máx. 485	máx. 1430 mín. 917	kPa	D 1267 o D 6897	
Residuo Volátil:						
- Temp. ebullición a 95% evaporado o	máx. -38,3	máx. 2,2	máx. 2,2	° C	D 1837	
- Butanos y más pesados	máx. 2,5	-	máx. 30	% (v/v)	D 2163	
- Pentanos y más pesados	-	máx. 2,0	máx. 2,0	% (v/v)	D 2163	
Humedad	pasa	-	-	-	D 2713	

Figura A.1: Norma Chilena NCh72.Of1999, "Gases Licuados de petróleo - Especificaciones".
Fuente: <http://www.enap.cl/>

A.2. Composición

**INFORME DE ANÁLISIS DE GAS LICUADO DE PETRÓLEO**

INFORME N°: LAB106 /2013

FECHA: 10 de Mayo de 2013

1.- IDENTIFICACIÓN DEL GAS LICUADO DE PETRÓLEO, GLP.

1.1. NAVE: PACIFICGAS

1.2. PRODUCTO SEGÚN ORIGEN: PROPANO

1.3. PROCEDENCIA DE LA MUESTRA: TK1-C3, TK2-C3 y TK3-C3.

NORMA TÉCNICA DE ANÁLISIS: NCh.72 Of 99

2.- COMPOSICIÓN NCh 1941

Componentes	TK1- C3	TK2- C3	TK3-C3	Concentración
Etano	1.00	1.05	1.07	% Vol.
Propano	96.91	97.13	96.81	% Vol.
Propilano	0.00	0.00	0.00	% Vol.
Iso- Butano	1.94	1.65	1.96	% Vol.
N- Butano	0.15	0.17	0.16	% Vol.
1-Buteno	0.00	0.00	0.00	% Vol.
Iso-Buteno	0.00	0.00	0.00	% Vol.
Iso-Pentano	0.00	0.00	0.00	% Vol.
N-Pentano	0.00	0.00	0.00	% Vol.
	100	100	100	% Vol.

3.- OTROS ANALISIS NCH 72	UNIDAD	NORMA	TK1-C3	TK2-C3	TK3-C3	CUMPLE
Odorización	---	NCh-2394	N.A	N.A	N.A	N.A
Corrosión lamina de Cobre	Clase	NCh-78	N° 1	N° 1	N° 1	SI
Temp. Ebull. Al 95% evaporación	°C	NCh-74	-38.5	-38.5	-38.5	SI
Contenido de Azufre antes Odorizar	ppm	NCh-1962	5.18	4.71	4.65	SI
Presión de Vapor a 37.8 °C	Kpa	NCh-77	1228	1228	1228	SI
Humedad / Agua Libre	---	NCh-75	Pasa	Pasa	Pasa	SI
Residuo en Evaporación de 100 mL	ml	NCh-1940	0.0	0.0	0.0	SI
Observación Mancha de aceite	---	NCh-1940	Cumple	Cumple	Cumple	SI
Densidad 15°C	K/L	NCh-1961	0.508	0.508	0.508	SI
Butanos y más pesados	% vol.	NCh-1941	2.09	1.82	2.12	SI
OLEFINAS	% vol.	NCh-1941	0.00	0.00	0.00	SI
DIOLEFINAS+ACETILENO	ppm	NCh-1941	0.00	0.00	0.00	SI
PENTANOS	% vol.	NCh-1941	0.00	0.00	0.00	SI
Densidad Calculada	K/L	ASTM 2596	0.5073	0.5071	0.5073	N.A
Metanol	ppm	Dräger CMS	168	245	300	N.A

OBSERVACIONES GENERALES: Producto muestreado por personal de Ecoinservice, de acuerdo a Norma Chilena NCh.73/1.
N.A = No Aplica


Juan Carlos Aliaga T.
Químico Analista

Figura A.2: Composición GLP en Chile.

Fuente: www.cdt.cl/download/4527/

A.3. Precio a Granel, Región Metropolitana

Tarifas en \$/litros Gas Licuado Normal (con I.V.A.)		
Región	Comuna	Vigente a contar del 21-11-jueves
RM	RES.RM CONCHALI	\$ 708
	RES.RM C° NAVIA	\$ 708
	RES.RM INDEPEND.	\$ 708
	RES.RM QUINTA NORMAL	\$ 708
	RES.RM PUDAHUEL	\$ 708
	RES.RM LO PRADO	\$ 708
	RES.RM RECOLETA	\$ 708
	RES.RM SAN MIGUEL	\$ 708
	RES.RM SAN JOAQUIN	\$ 708
	RES.RM LA CISTERNA	\$ 708
	RES.RM LA GRANJA	\$ 708
	RES.RM P.AGUIRRE C.	\$ 708
	RES.RM SAN RAMON	\$ 708
	RES.RM LO ESPEJO	\$ 708
	RES.RM SANTIAGO	\$ 708
	RES.RM EST.CENTRAL	\$ 708
	RES.RM LA PINTANA	\$ 708
	RES.RM MACUL	\$ 708
	RES.RM VITACURA	\$ 679
	RES.RM NUNOA	\$ 679
	RES.RM LO BARNECHEA	\$ 679
	RES.RM LAS CONDES	\$ 679
	RES.RM LA REINA	\$ 679
	RES.RM PENALOEN	\$ 679
	RES.RM PROVIDENCIA	\$ 679
RES.RM MELIPILLA	\$ 718	
RES.RM QUILICURA	\$ 718	
RM	RES.RM RENCA	\$ 723
	RES.RM HUECHURABA	\$ 723
	RES.RM CERRILLOS	\$ 723
	RES.RM EL BOSQUE	\$ 723
	RES.RM LA FLORIDA	\$ 723
	RES.RM MAIPU	\$ 723
	RES.RM PUENTE ALTO	\$ 723
	RES.RM SAN BERNARDO	\$ 723
	F.GAS MELIP	\$ 723
	SAN PEDRO	\$ 723
	RES.RM PEÑAFLO	\$ 723
	RES.RM EL MONTE	\$ 723
	RES.RM TALAGANTE	\$ 723
	RES.RM ISLA DE MAIPO	\$ 723
	RES.RM PAD. HURTADO	\$ 723
	RES.RM BUIÑ	\$ 718
	RES.RM C. DE TANGO	\$ 718
	RES.RM MALLOCO	\$ 718
	RES.RM PIRQUE	\$ 718
	RES.RM CURACAVI	\$ 718
	RES.RM PAINE	\$ 718
	RES.RM ALHUE	\$ 718
	RES.RM MARIA PINTO	\$ 718
	RES.RM COLINA	\$ 723
	RES.RM LAMPA	\$ 723
	RES.RM SN J.DE MAIPO	\$ 723
	RES.RM BATUCO	\$ 723
RES.RM TIL TIL	\$ 723	

Figura A.3: Precio venta GLP 21 de noviembre de 2019.

Fuente: www.lipigas.cl/hogar/granel-tanque/lista-de-precios/

A.4. Cálculo PCI de GLP

En primer lugar se definen los pesos atómicos de los elementos:

Tabla A.1: Peso atómicos.

Elemento	Peso atómico [kg/kmol]
H	1,008
C	12,01
N	14,01
O	16

Fuente: Termodinámica Cengel

Para una composición volumétrica de 97 % propano y 3 % butano se determina su masa molar, usando los pesos atómicos:

$$MM_{C_3H_8} = 12 \cdot 3 + 1,008 \cdot 8 = 44,09 \left[\frac{kg}{kmol} \right]$$

$$MM_{C_4H_{10}} = 12 \cdot 4 + 1,008 \cdot 10 = 58,12 \left[\frac{kg}{kmol} \right]$$

A, continuación se deben determinar las fracciones másicas de los componentes con la siguiente ecuación:

$$X_s = \frac{Y_s \cdot MM_s}{\sum Y_s \cdot MM_s} \quad (A.1)$$

Donde: X_s = La fracción másica de una sustancia.

Y_s = La fracción volumétrica de una sustancia.

MM_s = La masa molar de una sustancia.

Por lo tanto las fracciones másicas son:

$$X_{C_3H_8} = \frac{97\% \cdot 44,09}{97\% \cdot 44,09 + 3\% \cdot 58,12} = 96,1\%$$

$$X_{C_4H_{10}} = \frac{3\% \cdot 58,12}{97\% \cdot 44,09 + 3\% \cdot 58,12} = 3,9\%$$

Finalmente, con los valores de Ingemecánica [15], para poderes caloríficos inferior, se determina el PCI del combustible:

$$PCI_{GLP} = PCI_{C_3H_8} \cdot X_{C_3H_8} + PCI_{C_4H_{10}} \cdot X_{C_4H_{10}} = 49790 \cdot 0,961 + 50626 \cdot 0,039 = 49822,38 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (A.2)$$

Apéndice B

Equipo Fungicida

B.1. Dimensionamiento Equipo

Tabla B.1: Dimensiones componentes equipo Heat.

Estanque Principal	Altura [m]	1,1
	Área Base [m^2]	2,8
	Volumen [l]	3080
Cavidades intercambiador	Altura cavidades [m]	0,7
	Área total intercam. [m^2]	1
	Volumen total cavidades [L]	700
Tubos intercambiador	Diámetro tuberías [m]	0.1
	Largo tubos primer tramo [m]	0,5
	Número de tubos primer tramo	
	Largo tubos segundo Tramo [m]	
	Número de tubos segundo tramo	
	Volumen Total de tubos intercam. [L]	
Tubos entrada-salida equipo	Diámetro tuberías [m]	0.1
	Número de tubos	2
	Largo de tubos	
	Volumen total [L]	

Fuente: Johann Schwarze

Apéndice C

Quemador equipo fungicida

C.1. Especificaciones

Tabla C.1: Especificaciones técnicas Quemador Riello Rs 34 MZ.

Marca	Riello		
Modelo	RS 34 MZ		
Potencia	2ª llama	kW	125 - 390
	1ª llama	kW	45
Combustible	GN: G20-G21-G22-G23-G25-GLP		
Funcionamiento	<ul style="list-style-type: none">• Intermitente (mín. 1 paro en 24 horas).• 2 llamas (alta y baja llama) o 1 llama (todo - nada)		
Utilización	Calderas: de agua, a vapor y acéite térmico		
Temp ambiente [°C]	0-40		
Temp máx aire comburente [°C máx]	60		
Alimentación eléctrica	V	230 ~ +/- 10%	
	Hz	50/60-monofásica	
Motor eléctrico	rpm	2800/3400	
	W	300	
	V	220-240	
Corriente de arranque	A	15	
Corriente de funcionamiento	A	3,2	
Potencia absorbida	W máx	600	

Fuente: www.riello.com



Figura C.1: Quemador Riello RS 34 MZ.

C.2. Campo de trabajo

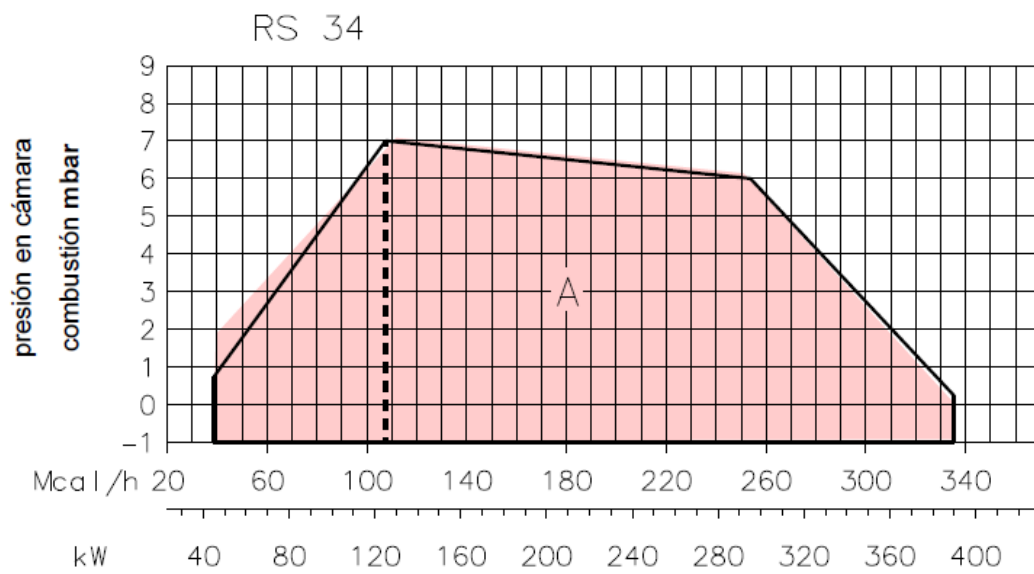


Figura C.2: Campo de trabajo en quemador Riello RS 34 MZ.

Apéndice D

Fungicida Imazalil

Tabla D.1: Datos identificación Imazalil.

Datos Imazalil	
Fórmula Química	$C_{14}H_{14}Cl_2N_2O$
Peso Molecular	297,2 kg/kmol
Clasificación	Imazalol
Tipo de Plaguicida	Fungicida
Uso	Agrícola

Tabla D.2: Propiedades Físicas y químicas Imazalil Fungaflor 500 EC

Propiedades Imazalil	
Concentración	50 % p/v
Punto ebullición	187,6°C
Densidad (24°)	1,12 g/ml
Solubilidad	Soluble en agua
Ph	6,76 (5 % sol)

Fuente: afipa.cl

Apéndice E

Dispositivo detector de corriente con Arduino

E.1. Código

```
1 //-----
2 //PROGRAMA MAF RODA 2019, MEDICION TIEMPO ENCENDIDO BOMBA
  ALIMENTACION//
3 //-----
4 //-----
5 #include "RTCLib.h" //Necesario para el reloj DS1307
6 RTC_DS1307 rtc;
7 char daysOfTheWeek[7][12] = {"Domingo", "Lunes", "Martes", "Miercoles",
  "Jueves", "Viernes", "Sabado"};
8 //-----
9 #include <SPI.h>      // incluye libreria interfaz SPI
10 #include <SD.h>      // incluye libreria para tarjetas SD
11 //-----
12 const int led = 13;
13 const int aux = 1;
14 const int entrada = 2;
15 int valor_entrada; // creamos una variable de tipo entero para que el
  arduino reconozca
16 int valor_aux;      // variable auxiliar para encendido y apagado
17 File archivo;      // objeto archivo del tipo File
18 #define SSpin 10    // Slave Select en pin digital 10
19
20 void setup() {
21   while (!Serial);
22
23   Serial.begin(9600); // inicializa monitor serie a 9600 bps
24   Serial.println("Inicializando_tarjeta_...");// texto en ventana de
  monitor
25   Serial.println("_");
26   if (!rtc.begin()) {
```

```
27     Serial.println("Couldn't find RTC");
28     while (1);
29 }
30 if (!SD.begin(SSpin)) { // inicializacion de tarjeta SD
31     Serial.println("fallo en inicializacion SD!"); // si falla se
        muestra texto correspondiente y
32     return; // se sale del setup() para finalizar el programa
33 }
34 archivo = SD.open("medicion.txt", FILE_WRITE); // apertura para
        lectura/escritura de archivo prueba.txt
35
36 if (!rtc.isrunning()) {
37     Serial.println("RTC is NOT running!");
38     rtc.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__));
39 }
40
41 pinMode(led, OUTPUT); // declaramos el pin como salida
42 pinMode(A2, INPUT); // declaramos el pin como entrada
43
44 Serial.println("Empiezan las mediciones");
45 Serial.println("_");
46 }
47 void loop() {
48     valor_entrada = analogRead(A2); // guardamos la lectura digital en
        la variable(valor_entrada)
49     DateTime now = rtc.now();
50     String dataString="";
51
52 if (valor_entrada > 197 && valor_aux == 1) { // si valor de la
        entrada es 1 logico o 5 voltios
53
54     digitalWrite(led, true);
55
56     Serial.println("escribiendo archivo de medicion...");
57     dataString+= String(now.day(), DEC);
58     dataString+= String('/');
59     dataString+= String(now.month(), DEC);
60     dataString+= String('/');
61     dataString+= String(now.year(), DEC);
62     dataString+= String("_");
63     dataString+= String(daysOfTheWeek[now.dayOfTheWeek()]);
64     dataString+= String("_");
65     dataString+= String(now.hour(), DEC);
66     dataString+= String(':');
67     dataString+= String(now.minute(), DEC);
68     dataString+= String(':');
69     dataString+= String(now.second(), DEC);
70     dataString+= String();
```

```
71
72 archivo = SD.open("medicacion.txt", FILE_WRITE);
73 archivo.println("Hora_de_Encendido");
74 archivo.println(dataString);
75 archivo.println(valor_entrada);
76 archivo.close(); // cierre del archivo
77 Serial.println("escritura_correcta");
78
79 Serial.println("Hora_de_Encendido");
80 Serial.println(dataString);
81 Serial.println("_");
82
83 valor_aux = 0;
84 }
85 if (valor_entrada < 197 && valor_aux==0) {
86
87     digitalWrite (led, false);
88
89     dataString+= String(now.day(), DEC);
90     dataString+= String('/');
91     dataString+= String(now.month(), DEC);
92     dataString+= String('/');
93     dataString+= String(now.year(), DEC);
94     dataString+= String("_");
95     dataString+= String(daysOfTheWeek[now.dayOfTheWeek()]);
96     dataString+= String("_");
97     dataString+= String(now.hour(), DEC);
98     dataString+= String(':');
99     dataString+= String(now.minute(), DEC);
100    dataString+= String(':');
101    dataString+= String(now.second(), DEC);
102    dataString+= String();
103
104    archivo = SD.open("medicacion.txt", FILE_WRITE);
105    archivo.println("Hora_de_Apagado");
106    Serial.println("escribiendo_archivo_de_Medicacion");
107    archivo.println(dataString);
108    archivo.println(valor_entrada);
109    archivo.close(); // cierre del archivo
110    Serial.println("escritura_correcta");
111
112    Serial.println("Hora_de_Apagado");
113    Serial.println(dataString);
114    Serial.println("_");
115    valor_aux=1;
116 }
117 }
```

E.2. Montaje Final

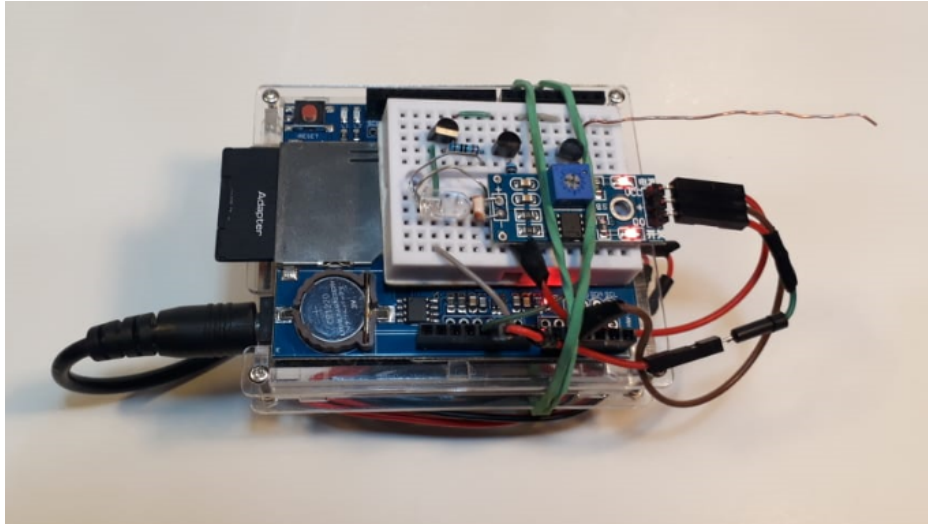


Figura E.1: Montaje final equipo detector de corriente.

Fuente: Johann Schwarze

Apéndice F

Gases de escape

F.1. Calor específico como una función de temperatura

$$c_p = a + bT + cT^2 + dT^3$$

(T en K, c_p en $kJ/kmol \cdot K$)

Tabla F.1: Tabla con calores específicos para gases de escape

Sustancia	Fórmula	a	b	c	d	Rango de temp, K
Dióxido de carbono	CO_2	22,26	$5,981 \cdot 10^{-2}$	$-3,501 \cdot 10^{-5}$	$7,469 \cdot 10^{-9}$	273-1800
Oxígeno	O_2	25,48	$1,520 \cdot 10^{-2}$	$-0,7155 \cdot 10^{-5}$	$1,3121 \cdot 10^{-9}$	273-1800
Agua (vapor)	H_2O	32,24	$0,1923 \cdot 10^{-2}$	$1,055 \cdot 10^{-5}$	$-3,595 \cdot 10^{-9}$	273-1800
Nitrógeno	N_2	28,90	$-0,1571 \cdot 10^{-2}$	$0,8081 \cdot 10^{-5}$	$-2,873 \cdot 10^{-9}$	273-1800
Monóxido de carbono	CO	28,16	$0,1675 \cdot 10^{-2}$	$0,5372 \cdot 10^{-5}$	$-2,222 \cdot 10^{-9}$	273-1800

Fuente: K. A. Kobe y R. E. Lynn, Jr., Chemical Review 52 (1953), pp. 117-236; y ASHRAE, Handbook of Fundamentals (Atlanta, GA: Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Acondicionamiento de Aire, Inc., 1993), pp. 16.4 y 36.1..

F.2. Resultados analizador de gases

testo 340	
V1. 13	61686224/E
Carpeta	
Situación	
30.09.2019	18:03:58
Combustible:	Propano
O2ref.:	3.0%
CO2max:	13.7%
433.4	°C Temp. Gas. com
24.2	°C TA
3.61	% O2
19	ppm CO
11.34	% CO2
22	ppm CO corregido
82.3	% REN
17.7	% qA
-----	kg/h Caudal másic
Número de opacidad	
Promedio :	-----
Oleod	-----
Temper. de radiación:	----- °C

Figura F.1: Ticket de combustión de gases Testo.

Fuente: Johann Schwarze

F.3. Ecuaciones para determinar fracción volumétrica de CO

Dados λ e Y_{CO_2} :

$$Y_{O_2} = \frac{A + 2B - Y_{CO_2}(A + K)}{3A + 2(K + B)} \quad (F.1)$$

$$Y_{CO} = \frac{2A - 2(A + K + B) \cdot Y_{CO_2}}{3A + 2(K + B)} \quad (F.2)$$

Donde:

$$A = 22,39 \frac{X_C}{12,01}$$

$$B = 0,21(\lambda - 1)V_{a,e}^0$$

$$K = 0,79\lambda V_{a,e}^0$$